École Royale
des
Ponts et Chaussées

1842 – 1843

Notes prises au cour de chemin de fer (1842 – 1843)

Leçons faites à l'école des ponts et chaussées, ayant pour objet la description des travaux exécutés sur le chemin de fer de Paris à Orléans, et quelques considérations générales sur les chemins de fer.

1ère Leçon

Les leçons qui suivent n'ont pas pour objet un cours complet sur les chemins de fer, mais uniquement la description des travaux du chemin de fer de Paris à Orléans avec quelques considérations générales.

Idées générales sur l'exploitation *d*'un chemin de fer.

La première chose à considérer est la locomotive. Les locomotives ont beaucoup varié de poids : dans l'origine elles pesaient 6 tonnes ; on a successivement élevé leur poids à 8, 10 et 12 tonnes ; celles de Corbeil pèsent 15 tonnes, celles *d*'Orléans pèseront près de 16 tonnes.

Derrière la locomotive se trouve le tender, voiture qui porte l'eau et le coke nécessaires à l'alimentation de la machine. Les tenders ont comme les machines varié le poids ; ceux du chemin de fer de Paris à Orléans sont à six roues, pesant 10 tonnes tout chargés. Ils contiennent habituellement 4 mètres cubes *d*'eau et 500 à 600 kilog. De coke.

Les voitures de voyageur sont de trois classes : les diligences, les wagons et les wagons découverts. Ces voitures vides pèsent en moyenne 3500 k elles contiennent de 24 à 36 voyageurs, de telle sorte que chargées, leur poids est de 5t ½ environ.

Les wagons de bagages pèsent – chargés 5t ½.

Les wagons de farine et de marchandise, 6t, y compris chargement.

Les wagons de chaises de poste 5t.

Les wagons-écuries pour le transport des bestiaux, 4t ½, y compris le chargement.

La voie a 1^{m},44 de largeur entre les bords intérieurs des rails. Cette cote est jusqu'à ce jour uniforme pour tous les grands chemins de fer en France.

Les changements de voie ont pour objet de faire passer la machine *d*'une voie sur une autre. La même voie ne doit jamais, autant que possible, servir que dans le même sens : il y a la voie *d*'allée et la voie de retour. Les changements s'opèrent au moyen *d*'aiguilles mobiles que l'on approche ou que l'on éloigne suivant que l'on veut changer de voie ou conserver la même.Cette manoeuvre demande pour certains changements de voies, la présence *d*'un homme appelé aiguilleur. C'est de lui seul et non du mécanicien que dépend le passage sur telle ou telle voie.

Pour passer d'une voie à une autre faisant avec la première un certain angle, on se sert *d*'une plateforme tournante. C'est une plaque en fonte qui porte une ou deux voies et qui est assez grande

pour porter les roues de la voiture. Cette plateforme porte sur un chariot mobile, comme elle, autour *d*'un axe vertical.

Sans entrer dans le détail de la machine à vapeur, nous dirons seulement ce que la locomotive offre de particulier. La locomotive se compose *d*'une machine à vapeur et de deux roues motrices *d*'un grand diamètre (5 à 6 pieds anglais) ; l'essieu porte deux coudes à angle droit qui formant deux espèces de manivelles : la tige du piston agit à l'extrémité du coude au moyen *d*'une bielle. Un mouvement de rotation est ainsi communiqué à la roue motrice ; comme elle ne peut tourner sur elle même, en vertu du frottement de la roue sur le rail, elle avance. Si cependant la charge que la machine doit tirer produit sur elle un effort plus grand que le frottement de la roue sur le rail, la machine n'avancerait pas et les roues motrices tourneraient sur place. Il y a deux coudes parce qu'avec un seul il y aurait un moment ou la bielle n'aurait aucun effet pour produire le mouvement. Ces essieux coudés sont des pièces difficiles à construire dans les locomotives ; mais on ne peut les éviter pour laisser passage à la bielle. L'essieu est fixé aux roues ; les deux ou les quatre autres roues de la machine tournent en vertu de la liaison que le système établit entre elles et les deux roues motrices.

Calculs sur la locomotive afin de donner une idée nette du travail qu'elle fournit. Nous adopterons les notations de *M*. Guyonneau de Pambour qui est l'auteur de la théorie sur la locomotive que nous développerons ici :

m (tonnes)	poids de la machine locomotive ;
M (tonnes)	poids du convoi, y compris le tender ;
K (Kilogrammes)	coefficient du frottement par tonne ; (K = 2^{K},70) c'est-à-dire que si à la voiture on attache une corde passant par une poulie, le poids nécessaire pour déterminer le mouvement de la voiture sera de K Kilog. par tonne.
g (millimètres	C'est la pente en millimètres pour(*) mètre que la voie peut avoir au point considéré
mètres	*g* en mètres exprime la pente par kilomètre.
kilogrammes)	*g* en Kilogrammes est l'effort dû à la gravité suivant la pente pour le poids d'une tonne.
V (Kilomètres)	vitesse du convoi par heure.

La première question que nous nous proposons de résoudre est celle-ci :

Lorsqu'un convoi est en marche, et qu'il a acquis uns vitesse uniforme, déterminer l'effort que la machine exerce ? Ou autrement, supposons le convoi en marche, détachons pour un instant le tender et toutes les voitures, et cherchons le poids qui attaché à une corde passant sur une poulie produirait sur la machine le même effet que le convoi.

Soit *X* ce poids, exprimé en Kilogrammes.

Si la voie est horizontale,

(*) Dans le manuscrit, il est bien écrit *millimètres <u>pour</u> mètre*

$$X = KM$$

Si la voie est inclinée,

$$X = KM \pm gM \pm gm$$

en tenant compte du poids m de la locomotive. Le signe + correspond à un plan ascendant, le signe - à un plan descendant.

Si nous tenons compte de la résistance de l'air qu'on avait longtemps négligée et qui produit cependant une résistance notable, il faut ajouter un nouveau terme. On l'a évaluée par expérience ; elle est proportionnelle au carré de la vitesse. On a donc :

$$[\,1\,] \quad X = KM \pm gM \pm gm + uv^2$$

Application. Soit un convoi de 12 voitures, sur une voie de niveau. Les termes gM et gm disparaissent de l'équation en prenant pour poids de chaque voiture 5^t ½ et 10^t pour celui du tender, $M = 76^t$ et comme $K = 2.70$, on aura $KM = 76 \times 2{,}70 = 205^k{,}2$.

Évaluons maintenant la résistance de l'air. Nous supposerons l'air parfaitement en repos. S'il fait du vent il faut en tenir compte, soit en plus, soit en moins. u est proportionnel à la surface que le convoi présente à l'air, $\sum$ étant cette surface, on a :

$$u = a \sum$$

a est en Kilogrammes la résistance qu'oppose à l'air une surface de 1 mètre carré se mouvant avec une vitesse de 1 Kilomètre à l'heure.

$$a = 0^k{,}0064$$

Quant à $\sum$, voici comment il s'estime : w étant le nombre des wagons d'un convoi, y compris le tender et la locomotive, on a :

$$\sum = (6 + w)^{m.s}$$

$6^{m.s}$ est l'excédent de surface que présente sur les autres wagons le premier wagon ou la machine, et on suppose ensuite que la résistance de l'air par wagon tender, ou machine, produite soit sur les roues et les essieux, soit sur les surfaces extérieures de chaque voiture, en vertu du jour qui les sépare entr'elles agit sur une surface de $1^{m.s}$

Le terme uv^2 devient ainsi :

$$uv^2 = 0{,}005064\,(6 + w)\,v^{2.}$$

Dans le cas que nous considérons où w = 14 et où la vitesse est de 40 kilomètres par heure, on a $uv^2 = 162^{Kilog.}$ et par suite

$$X = 367^{\,K}$$

Ainsi la machine est dans le même cas que si un poids de 367^K était attaché à une corde verticale passant par une poulie et que cette corde devenue horizontale le fut ensuite à la machine ; celle-ci devrait lever ce poids avec une vitesse de 10 lieux ou de 40 Kilom. à l'heure.

A ces résistances que la machine a à vaincre, il faut ajouter ses propres frottements. C'est un excédant de résistance que l'on peut représenter encore par un poids placé derrière la machine.

Soit F le frottement des divers organes de la machine, lorsqu'elle fonctionne seule et sans charge à tirer ; on a d'après Pambour

$$F = 6{,}70 \times m \qquad \text{ou si l'on veut} \qquad F = 7\ m\ .$$

Il y a lieu de revoir cette manière d'évaluer F et de la modifier, les machines actuelles étant bien différentes de celles sur lesquelles Pambour a opéré ; mais le but qu'on se propose ici est plutôt de donner une idée nette de la machine et de la manière dont on doit se rendre compte de son travail, que de fournir des coefficients parfaitement exacts pour la pratique ; on laisse à d'autres le soin de faire les expériences nécessaires, si difficiles et si délicates, pour la détermination exacte de ces coefficients.

Le frottement de la machine augmente en outre proportionnellement avec la charge qu'elle tire, et on peut l'évaluer en tout par la formule

$$F + \partial\, X$$

∂ étant un coefficient constant qui d'après *M*. de Pambour est de 0,14 pour les machines à deux roues motrices et de 0,21 pour les machines à quatre roues motrices.

En désignant par Y la somme totale des résistances que la machine a à vaincre, on a

$$[\,2\,]\quad Y = F + (1 + \partial)\, X\ .$$

et dans l'application précédente, en supposant que la machine pesât 15 tonnes comme celle de Corbeil, on aura

$$Y = 523^{K}\ ,38\ .$$

La résistance que la machine a à vaincre étant connue, voyons ce qui se passe dans la machine

Nous supposerons le mouvement devenu uniforme, ce qui a lieu peu de moments après sa mise en mouvement.

Soit :

D (mètres)	Le diamètre de la roue motrice,
d (mètres)	Le diamètre du cylindre ou se meut le piston
l (mètres)	La course du piston

Soit, pour un moment, z la force qui agit sur le piston ou au bout de la manivelle. La circonférence que décrit l'extrémité de la manivelle ou le point d'application de la force z est évidemment 2l ; le rayon de cette manivelle ou le bras de levier au bout duquel agit la force z est donc $\frac{l}{\pi}$.

La force horizontale qui s'oppose au mouvement de la machine peut être considérée comme appliquée sur le rail, dans son sens et au point où il touche la roue. *S*'il n'y avait pas de frottement, la roue tournerait sur elle-même. Mais il y a là une espèce d'engrenage, une résistance produite par les aspérités de surface de contact qui est égal à la force horizontale, à la force y que la machine doit vaincre.

Cette force Y agit avec un bras de levier $\frac{D}{2}$.

Il faut pour l'uniformité du mouvement qu'il y ait un équilibre entre ces deux forces x et y, ou que leurs mouvements soient égaux par rapport à l'axe de rotation ; on a donc,

$$Y\,\frac{D}{2} = z\,\frac{l}{\Pi}$$

d'où

$$z = \frac{\Pi\, D}{2\, l}\, Y$$

Appelons maintenant R la pression réelle exprimée en Kilogrammes par mètre carré qu'exerce la vapeur sur le piston.

La pression effective sera $R - p - p'v$, $p + p'v$ exprimant la pression également en Kilog. et par mètre carré qu'éprouve le piston dans le sens opposé à sa marche

p = 10335[K], est la pression atmosphérique

$p'v$ est la pression due à la vapeur qui s'échappe par la tuyère et qui varie avec la vitesse de la marche de la machine ; cette pression est due à ce que la vapeur ne débouche pas à l'air libre, mais dans un conduit appelé tuyère où elle a pour fonction en sortant avec une certaine pression d'établir un courant dans le tuyau de la cheminée et de favoriser ainsi la combustion.

p' = 76[K],62 nous la supposons une constante pour plus de simplicité, mais il y aurait peut-être ici de nouvelles expériences à faire pour déterminer la contre-pression qu'éprouve le piston dans sa marche, par l'effet de la tuyère.

Or, comme il y a deux pistons, dont la surface ensemble est de $2\,\frac{\Pi\, d^2}{4}$ ou $\frac{\Pi\, d^2}{2}$ on aura

$$Z = \frac{\Pi\, d^2}{2}\,(R - p - p'v)$$

d'où en remplaçant Z par sa valeur en fonction de y et $Z = \frac{\Pi\, d^2}{2\, l}\, y$ tirant la valeur de R

$$[\,3\,] \qquad R = \frac{D}{d^2\, l}\, Y + p + p'v$$

appliquant cette formule au cas particulier que nous avons déjà considéré et supposant, comme pour nos machines de la ligne de Corbeil,

$$D = 1{,}33 \qquad d = 0{,}33 \qquad l = 0{,}457\ ,$$

nous avons, en effectuant le calcul,

$$R = 32542^{K}$$

Notes supplémentaires. Le poids d'une locomotive à 6 roues pour voyageurs employée sur la ligne de Corbeil est de 15[t ;] le poids adhérent ou porté par les deux roues motrices est de 7 à 8 tonnes ; les différentes parties de la machine ont les dimensions suivantes :

D	diamètre de la roue motrice	1[m],85
l	course du piston	0,457

d diamètre du cylindre 0,33

La surface de chauffe totale est de 69,50 dont 5,10 pour les parois du foyer et le surplus pour les tubes.

Le poids d'une locomotive à 6 roues pour voyageurs (nouveau modèle) à employer sur la ligne d'Orléans est de $16^{t.}$. Le poids adhérent ou porté par les 2 roues motrices est de $7^{t}50$ à $8^{t}50$.

$$D = 1{,}67 \qquad l = 0{,}508 \qquad d = 0{,}355$$

La surface de chauffe totale est de 76,00 dont 2,87 pour les parois du foyer et le surplus pour les tubes.

Le poids d'une locomotive à 6 roues pour marchandises (dernier modèle) avec roues accouplées à employer sur la ligne d'Orléans est de 16^{t}. Le poids adhérent ou porté par les 4 roues motrices est de 10 à 11^{t}.

$$D = 1{,}37 \qquad l = 0{,}508 \qquad d = 0{,}355$$

La surface de chauffe totale est de 76,00 dont 2,87 pour les parois du foyer et le surplus pour les tubes.

Les tenders sont à 6 roues ; un tender vide pèse . . . . . $5\ 400^{K}$
plein, avec $4^{m.c}$ d'eau environ et 500 à 600 K de coke . . . . . $10\ 000^{K}$

	Poids exacts	
	des Wagons vides	des wagons chargés
Voitures de 1ère classe ou diligence, portant des voyageurs	3345^{K}	5025^{K}
Voitures de 2e classe pour voyageurs, portant 30 personnes	3560^{K}	5660^{K}
Voitures de 3e classe découverte pour voyageurs, portant 30 personnes	2880^{K}	5400^{K}
Wagons de bagages	4200^{K}	5200^{K}
Wagons pour les sacs de farine	5060^{K}	6060^{K}
Wagons pour les marchandises	2955^{K}	5955^{K}
Wagons de chaise de poste	2795^{K}	5295^{K}
Wagons-écuries	3120^{K}	4320^{K}

Poids des voitures et wagons.

Dans l'application, on peut supposer, en prenant en moyenne que

un wagon de voyageurs pèse vide . . . . . 3500^{K} et plein . . . . . 5500^{K}.

et un wagon de marchandises vide . . . . . 3000^{K} et plein . . . . . 6000.

Les wagons de chaise de poste et les wagons écuries étant assimilés aux wagons de voyageurs.

Les roues des voitures ou wagons marchant à grande vitesse, c'est-à-dire avec des convois de voyageurs ont un diamètre de 1^{m},00. La paire avec son essieu pèse 476^{K}.

Les jantes de ces roues sont toutes légèrement coniques ; elles portent à l'intérieur un rebord ou bourrelet de 3 à 4 centimètres de saillie qui les empêche de sortir de la voie.

La largeur des voitures de voyageurs varie de 2^{m},40 à 2^{m},50 ; avec les marche-pieds, cette largeur est de 3^{m},10 ; une porte qui devrait donner passage à une voiture devrait avoir au moins 3^{m},16 de largeur.

La hauteur d'un wagon-écurie au-dessus du sol est de 3^{m},40 ; c'est le wagon le plus élevé.

2e Leçon.

Nous avons établi dans la dernière leçon les formules suivantes :

$$X = KM \pm gM + uv^{2.}$$
$$Y = F + (1 + \delta)$$
$$R = \frac{D}{d^2 l} Y + p + p'v$$

X représentant la résistance à vaincre en dehors du frottement de la machine

Y l'effort horizontal ou la résistance totale à vaincre pour traîner le convoi et surmonter les frottements de la machine ou autrement la résistance opposée par le rail à la roue motrice dans sa marche.

R la pression réelle exprimée en Kilogrammes par mètre carré que le vapeur exerce sur le piston : la pression effective sera $R - p - p'v$, $p + p'v$ exprimant aussi la pression en Kilog. par mètre carré qu'éprouve le piston dans le sens opposé à sa marche :

p est la pression atmosphérique ou 10335^{K} par mètre carré

$p'v$ est la pression due à la vapeur qui se trouve de l'autre côté du piston, ce terme varie avec la vitesse de la marche. Nous donnerons à p' la valeur constante $76^{K},62$. La limite entre lesquelles la vitesse varie étant assez rapprochée pour que cette hypothèse soit admissible.

La première des formules renferme dans le terme relatif à l'effort produit par la gravité la quantité M ; en réalité ce serait la composante du poids M, normale au plan incliné qu'il faudrait mettre dans la formule, mais vu la faible inclinaison de la voie on prend le poids lui-même M pour sa composante.

Deux particularités distinguent la locomotive des machines à vapeur ordinaires :

Il s'agissait d'abord de produire en peu de temps une grande quantité de vapeur ; on y est parvenu en faisant traverser la chaudière par un grand nombre de petits tubes à travers lesquels passent la flamme et qui lui présentent une très grande surface de chauffe.

La vapeur après avoir agi sur le piston et l'avoir amené à l'extrémité de sa course, s'échappe par un tuyau très étroit qui va déboucher dans la cheminée : le tirage et par conséquent l'activité du feu sont de beaucoup augmentés par cette disposition.

D'après ce que nous venons de dire, l'intérieur d'une locomotive se divise en trois compartiments principaux : fig. (1).

La boite à feu, la chaudière et les tuyaux, et la boite à fumée.

Soit S la vaporisation effective de la vapeur exprimée en mètres cubes par heure ; cette quantité est mesurée par la quantité d'eau employée ou sortie du tender, diminuée des pertes qui se produisent soit par les tuyaux de la pompe soit par la vapeur qui s'échappe par les soupapes de sûreté, soit enfin par l'eau qui passe dans les cylindres à l'état liquide entraîné par la vapeur et qui ne produit aucun effet. (nous n'entrerons pas dans le détail de l'évaluation de ces pertes, nous supposerons que S soit donné par le résultat d'une expérience sur la machine)

S varie avec la vitesse du convoi mais d'une faible quantité : si S est par exemple la vaporisation à une vitesse de 32 Kilomètres et S' la vaporisation à une vitesse de 40 Kilomètres on aura $S' = S \sqrt[4]{\frac{40}{32}}$

Soit μ le volume relatif de la vapeur dans le cylindre, c'est-à-dire le rapport dans un certain état de pression et de température entre le volume de la vapeur et celui de l'eau génératrice qui lui a donné naissance ou en d'autres termes le nombre de mètres cube qu'occupera la vapeur fournie par un mètre cube d'eau, ou enfin $\frac{1}{d}$, d étant la densité de cette vapeur, Pambour établit que μ et R sont liés entre eux par la relation

[4] $$\mu = \frac{1}{n} + g_n R, \quad n = 0{,}0001421, \quad (q) \quad g = 0{,}0000000471$$

Il établit également comme un fait d'expérience que la vapeur se conserve toujours dans les différents états de température et de pression qu'elle peut occuper successivement dans la machine à son maximum de densité, cette loi nous l'admettrons sans avoir eu l'occasion d'en vérifier l'exactitude ; μS sera le volume de la vapeur fournie en une heure par la chaudière sous la pression R. Ce volume de vapeur a pendant ce temps constamment empli les cylindres.

La base des cylindres est $\frac{\pi d^2}{4}$

La course du piston est l

Le jeu du cylindre étant représenté par c, le volume des deux cylindres sera

$$\frac{\pi d^2}{2} (l + c) .$$

On admet que $$c = \frac{1}{20} l \quad ;$$

$\frac{\mu S}{\frac{\pi d^2}{2} (l + c)}$ sera évidemment le nombre de fois que les cylindres auront été remplis en une heure : or, à chaque fois que les cylindres sont remplis, la roue motrice tourne d'une demi circonférence et avance par conséquent de : $\frac{\pi D}{2}$ donc, le chemin parcouru en une heure est

$$\frac{\pi D}{2} \; x \; \frac{\mu d}{\frac{\pi d^2}{2} (l + c)} \; mètres$$

c'est la vitesse par heure exprimée en mètres et la vitesse V qui doit être exprimée en Kilom. sera

[5] $$V = \frac{1}{1\,000} \; \frac{\mu S D}{d^2 (l + c)}$$

cette formule jointe aux quatre précédentes sert à résoudre les deux problèmes que l'on se propose le plus souvent : soit de trouver la vitesse que prendra un convoi composé d'un nombre connu de wagons ou d'une charge déterminée, c'est-à-dire v en fonction de M ; soit de déterminer le nombre de wagons que la machine pourra remorquer avec une vitesse donnée, c'est-à-dire M en fonction de V.

En éliminant X, Y, μ et R entre les cinq équations établies précédemment, on parvient à la formule donnée par Pambour.

$$V = \frac{1}{1\,000}\ \frac{l}{l+c}\ \frac{1}{q}\ \frac{S}{(1+\delta)\ [(K \pm g)\ M \pm gm + uv^2] + F + \frac{d^2 l}{D}\ (\frac{n}{q} + p + p' + p' v)}$$

cette formule donne V ; mais en fonction de V et ce n'est que par tâtonnement que l'on parvient à s'en servir ; mais il nous paraît plus simple de se servir des cinq formules que nous avons présentées plus haut, et c'est ce que nous ferons dans tous nos calculs.

En résolvant la formule par rapport à M, on trouve

$$M = \frac{1}{(1+\delta)\ (K \pm g)} \left[\frac{1}{1\,000}\ \frac{l}{l+c}\ \frac{S}{q\ v} - \frac{d^2\ l}{D} \left(\frac{n}{q} + p + p' v \right) - F \right] - \frac{1}{K \pm g}\ (u\ v^2 \pm g\ m)$$

M est encore donné ici en fonction de M car le terme uv^2 renferme implicitement M, attendu que pour déterminer v, il faut faire une hypothèse sur M puisque la résistance de l'air dépend du nombre de voitures.

-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-+-

Discussion des Formules.

1° Dans ces formules, Y comme nous l'avons dit est l'effort horizontal de la roue motrice sur le rail. Or il faut que le rail produise une résistance au moins égale à Y : car si Y était supérieure à cette résistance, la roue tournerait sur elle-même sans avancer ou comme on le dit elle patinerait. Cette adhérence du rail à la roue ou le frottement est d'environ $\frac{1}{10}^{e}$ du poids qui pèse sur la roue motrice : c'est pour augmenter cette adhérence que l'on augmente la partie du poids de la machine que supporte cette roue ; ainsi pour une machine de 16 tonnes les roues motrices supportent 8 ou 9 tonnes, il faut donc que Y ne dépasse pas 800 ou 900 Kilog.

2° Il ne faut point que la valeur de R dépasse 5 atmosphères, c'est une mesure réglementaire garantie par les soupapes de sûreté. Nous admettrons donc que R ne doit jamais dépasser 5 atmosphères, ou en nombre rond 50 000 Kilog.

3° μ <u>diminuant quand R augmente et augmentant quand R diminue</u>, comme le prouve la relation $\mu = \frac{1}{n + qR}$, la plus petite valeur de μ correspond à la plus grande de R ; or cette plus grande valeur de R étant 50 000 Kg la plus petite de μ sera 400. La température correspondante est de 157°8 ; donc la plus petite valeur de v pour une valeur déterminée de S sera

$$V = \frac{S\ D\ \mu}{d^2\ (l+c)\ 1000} = \frac{S\ D}{d^2\ (l+c)}\ \frac{400}{1\,000} = \frac{2}{5}\ \frac{S\ D}{d^2\ (l+c)}$$

si nous appliquons cela aux machines de Corbeil pour lesquelles $S = 2^{m.c.}$ nous aurons

$$\frac{D}{d^2\ (l+c)} = \frac{1{,}83}{0{,}0525} = \frac{18\,300}{525} = 35 \text{ environ}$$

le minimum de v sera 28 Kilom. environ. C'est le minimum de v pour $S = 2^{m.c.}$

Si l'on voulait aller moins vite il faudrait diminuer la vaporisation, mais il n'y aurait pas d'avantages sous le rapport de l'économie dans le combustible.

4° Le maximum de v correspond ainsi que nous l'avons vu au maximum de μ et au minimum de R, ce qui se comprend : or il faut toujours que R soit assez fort pour que la machine surmonte son propre frottement et traîne son tender. Le maximum de v correspondra donc à $M = 10^{Tonn.}$ c'est-à-dire au cas où le convoi se réduit à la machine et au tender.

Ici il est nécessaire d'avoir égard à la variation que S peut éprouver quand la vitesse augmente.

Soit S' la vaporisation correspondante à ce maximum de vitesse, nous aurons :

$$S' = S \sqrt[4]{\frac{v}{32}}$$

S étant la vaporisation correspondante à $v = 32^{Kilom.}$. Faisons l'hypothèse de $v = 64^{Kil.}$, ou 16 lieues à l'heure, $S = 2^{m.c.}$

nous aurons : $S' = S \sqrt[4]{2} = 2^{m.c.},38$

En partant de cette valeur de S' on arriverait par l'application de nos formules à une valeur de V qui serait de 59 Kilomètres. Cette valeur est inférieure à celle de 64 ^{K} dont nous sommes partis ; notre hypothèse de $V = 64$ est donc trop forte, il faudrait poser $V = 60$, on trouverait que cette hypothèse est trop faible et qu'en définitive la valeur de V est comprise entre 60 et 64 ; tâtonnant encore on trouvera 61^{K} pour la vitesse maximum des machines de Corbeil. C'est à peu près ce que l'expérience a fourni.

5° On pourrait se proposer de trouver la valeur de M correspondante au minimum de V ou à $V = 28^{Kilom.}$ μ étant égal à 400 et R à 50,000$^{\text{Kilog.}}$

En supposant $K = 3$ pour des raisons que nous donnerons tout à l'heure on trouve $M = 200^{Ton}$, le poids du tender étant $10^{\text{ton..}}$, il reste pour le poids des wagons 190^{t} ou en divisant par 5^{t} 50 qui est le poids d'un wagon on trouve environ 35 wagons. Maintenant dans la pratique on ne doit jamais arriver là :

1. parce que la pression dans la chaudière ne pouvant pas se maintenir constamment à 50.000$^{\text{Kilog.}}$ vu la grande perte qui s'opérerait par les soupapes de sûreté, il faut réduire un peu ce chiffre.
2. parce que la pression dans les cylindres ou sur le piston doit être d'une certaine quantité, quelque faible qu'on la suppose, plus petite que la pression dans la chaudière.
3. parce que, pour démarrer aux stations, il faut toujours avoir un excès de force assez notable pour mettre le convoi en mouvement, ce convoi ne pouvant pas au moment du départ remplir la fonction d'un volant comme quand il est en pleine marche.
4. parce que on n'est jamais bien de niveau et que abstraction faite des pertes résultant du tracé adopté il est des pentes qui résultent des inégalités dans la pose des rails et des tassements inégaux qui se produisent dans la voie.
5. parce que il y a des courbes qui ajoutent beaucoup de frottement.

6. parce que l'air n'est pas toujours tranquille comme nous le supposons dans nos formules et qu'il augmente considérablement la résistance quand il est directement contraire à la marche ou quand il souffle en travers et qu'il pousse les rebords de toutes les roues contre un rail et produit une espèce *d'*enrayage très nuisible à la marche du convoi.
7. parce que l'état des rails secs, humides, gras comme dans les dégels, peut faire varier le coefficient *K*. C'est pour avoir égard à cette variation et nous placer dans une hypothèse défavorable que nous avons fait tout à l'heure $K = 3$ au lieu de $K = 2{,}70$ valeur donnée par *M*. Pambour.
8. parce que cet état des rails influe surtout sur l'adhérence de la machine et peut la réduire considérablement ; le plus mauvais état des rails est quand ils sont gras ; l'état le plus favorable est quand ils sont bien secs en été, ou bien lavés par de grandes pluies.
9. parce que enfin la machine peut n'être pas en assez bon état ou le mécanicien assez soigneux pour faire produire à la machine toute la vapeur qu'elle peut fournir.

Toutes ces circonstances font qu'en définitive les formules ne peuvent pas remplacer complètement l'expérience et qu'il faut encore souvent s'en rapporter à elle ; cependant, les formules ont le grand avantage : 1° de donner une idée nette de la manière dont s'opère le mouvement. 2° de permettre d'établir les lois suivant lesquelles le mouvement doit varier. 3° enfin de ne pas s'écarter beaucoup de la vérité.

De l'effet utile.

Nous avons trouvé plus haut la valeur de *M* en fonction de *v*, nous obtiendrons l'expression de l'effet utile en multipliant par *v* cette valeur de *M*, et nous aurons :

$$M\,v = \frac{1}{(1+\delta)(K \pm g)}\left[\frac{1}{1000} + \frac{l}{l+c}\ x\ \frac{3}{q} - d^2\frac{lv}{D}\left(\frac{n}{q} + p + p'v\right) - F_y\right] - \frac{v}{K \pm g}\ (uv^2 \pm gm)$$

mais dans la pratique il vaut mieux chercher séparément *M* et *v* et en déduire *Mv* par une multiplication numérique.

Estimation de l'effet utile en chevaux. Un cheval vigoureux marchant au pas ou à raison de $4000^{\text{mètres}}$ à l'heure ou de $67^{\text{mètres}}$ par minutes (sa vitesse la plus avantageuse) peut d'une manière permanente exercer un effort de 67 Kilogrammes, ou, si l'on veut, soulever un poids de $67^{\text{Kil.}}$ suspendu à l'extrémité d'une corde, ou en nombre rond élever 4.500^{Kil}. à un mètre, par minute. La force par heure sera donc de $4.500 \times 60 = 270.000^{Kilog.\_mètres}$. Or, comme sur un chemin de fer de niveau il faut exercer un effort de 2,70 pour traîner une tonne, il s'ensuit qu'un cheval traînera par heure autant de fois une tonne à un kilomètre que $2{,}70 \times 1000$ ou 2700 sera contenu dans 270.000, c'est-à-dire 100 tonnes. La force d'un cheval sur un chemin de fer de niveau est donc représenté par 100 tonnes tirés à 1 Kilomètre ou par 100, l'unité étant la tonne multipliée par le kilomètre.

Pour avoir l'effort utile en chevaux il suffira de diviser *Mv* par 100.

3e Leçon

De l'effet utile maximum.

Si l'on reprend la valeur de Mv, on reconnaîtra que v n'entre que dans les termes négatifs, abstraction faite du cas du plan descendant où Mv peut acquérir une valeur très grande, indéfinie, mais qui est due à l'action de la gravité et non à la puissance de la machine et par suite est en dehors de notre examen. Donc Mv atteindra son maximum quand v sera le plus petit possible pour une vaporisation déterminée. Le minimum de v correspond au minimum de μ et au maximum de R qui est, comme on sait, $R = 50.000^{\text{Kil.}}$.

L'économie du combustible est une question importante. N étant la quantité de coke exprimée en Kilog. brûlée en une heure, résultat donné par l'expérience, la quantité de coke consommée par tonne et par kilomètre est $\frac{N}{(M - c)v}$, c étant le poids du tender qui ne doit pas être compté dans l'effet utile produit par le coke.

La quantité d'eau S réduite en vapeur par heure et agissant dans le cylindre n'est qu'une partie de l'eau totale S' dépensée par heure, et en général $S = 0{,}70\ S'$, eu égard aux pertes de tout genre, $0{,}25\ S'$ est entraîné à l'état liquide dans le cylindre et $0{,}05\ S'$ est la vapeur perdue par les soupapes. La quantité d'eau consommée par tonne et par kilomètre est $\frac{S}{(M - c)v}$.

N varie par mètre cube d'eau entre 140 et 175Kilog.. Le voyage de Paris à Corbeil dépense donc 2m.c d'eau, et 350K de coke environ.

Au moyen des formule établies ci-dessus, on peut résoudre une foule de problèmes, tous très simples. Nous en citerons quelques uns :

Soit M le poids d'un train sur un plan montant ou descendant et M'' le poids d'un train sur niveau que produirait la même résistance sur la machine, quelle est la relation qui lie ces deux quantités ?

Plan ascendant $\quad K\ M'' = K\ M + gM + gm$

Plan descendant $\quad K\ M'' = K\ M - gM - gm = K\ M - g\ (M + m)$

Par conséquent pour $K\ M = g\ (M + m)$, ou $g = \frac{K\ M}{M + m}$, on a $M'' = 0$; c'est le cas où le convoi descend sans que la machine exerce aucun effort ; en effet, on conçoit qu'il y a une pente pour laquelle le poids compense le frottement. Quand g sera plus petit que $\frac{K\ M}{M + m}$, la machine devra tirer ; quand g sera plus grand que $\frac{K\ M}{M + m}$, la machine tendra à être poussée ; mais il ne s'ensuit pas pour cela que la machine devra cesser de fonctionner, car elle pourrait n'être poussée que si faiblement qu'elle n'aurait pas la vitesse voulue, et alors il faudrait que la machine agisse.

1. On peut diviser les pentes en trois classes :

   1° Les pentes, entre 0 millimètres et 3, sur lesquelles la gravité est moindre que le frottement, et où le train ne marcherait pas sans l'aide de la machine.

2° Les pentes entre 3mm et 5mm, sur lesquelles la gravité l'emporte sur le frottement, et où les trains par conséquent descendent d'eux-mêmes, mais avec une vitesse qui n'est pas assez grande pour se passer du secours de la machine.

3° Les pentes au-dessus de 5mm où la gravité l'emporte tellement sur le frottement que les trains acquerraient trop de vitesse pendant leur chute, si on ne ralentissait leur vitesses par l'action des freins.

Dans le premier cas, la machine doit agir, et son action se calcule par les formules ci-dessus.

Dans le second cas, la machine doit encore agir, mais avec modération, c'est-à-dire en diminuant la vaporisation, ou perdant de la vapeur.

Dans le troisième cas, le mécanicien doit fermer tout à fait son régulateur, et la machine ne doit plus agir. Dans ce dernier cas, c'est un simple problème de gravité, dans lequel la machine ne figure plus que comme une voiture plus lourde que les autres.

Le poids du convoi est $M+m$; la force due à la gravité $g(M+m)$; la résistance due aux frottements $K(M+m)$; la force qui agit sur le convoi est donc :

$$(g-K)(M+m)$$

La résistance de l'air est $u\,v^2$.

Le mouvement s'accélérera d'abord, et deviendra bientôt uniforme quand on aura

$$(g - K)(M + m) = u\,v^2$$

On peut reconnaître, en appliquant cette formule que sur un plan incliné de 10 millimètres, pour un convoi de 10 wagons, la vitesse ne dépassera jamais 20 lieues à l'heure, ce qui est une vitesse souvent admise sur certains chemins anglais.

En effet $M = 10 \times 5^t,5 + 10 = 65$ $m = 15^t$; $M+m = 80^t$

$g - K = 10 - 3 = 7$ $u = 0{,}005064 \times (6+12) = 0{,}091$

On a donc, pour trouver v, l'équation : $7 \times 80 = 560 = 0{,}091\,v^2$

d'où $$v^2 = \frac{560}{0{,}091} = \frac{560000}{91} = 6152$$

V est donc un peu au-dessous de 79 kilomètres, et cette vitesse peut encore être réduite par les courbes et par les inégalités de la voie.

Cependant pour plus de sûreté et pour la conservation du matériel, on s'impose en général la règle sur les plans descendants de ne pas dépasser une vitesse de 10 lieux ou 40 Kilomètres à l'heure, ce que l'on obtient facilement avec des freins. On est même parvenu en Angleterre à modérer suffisamment la vitesse à l'aide de freins sur des pentes de 30 millimètres ; mais si tous les freins venaient à rompre, ce qui est un cas bien peu probable, la vitesse ne deviendrait pas infinie, comme le public se le figure quelquefois, et elle serait limitée par la résistance de l'air.

Proposons nous maintenant de trouver le temps de parcours sur un chemin en général, composé comme tous les chemins d'une série de paliers, de pentes, et de rampes.

Soient :

L, L', L'', L''', les longueurs de chacune de ces pentes, rampes ou paliers, exprimés en Kilomètres.

v , v' , v'' , v''' , les vitesses correspondantes pour un convoi M donné, calculées selon les formules ci-dessus.

Le temps de parcours sera évidemment

$$\frac{L}{v} + \frac{L'}{v'} + \frac{L''}{v''} + \frac{L'''}{v'''} + etc.$$

et la vitesse moyenne sur le chemin sera la longueur du chemin divisée par le temps du parcours ou :

$$\frac{L + L' + L'' + L''' + etc.}{\frac{L}{v} + \frac{L'}{v'} + \frac{L''}{v''} + \frac{L'''}{v'''} + etc.}$$

On peut en appliquant cette formule reconnaître qu'il y a toujours avantage à être de niveau et qu'un chemin de niveau vaut mieux qu'un pente et une contre-pente se succédant l'une à l'autre.

Cherchons maintenant la charge moyenne des machines pendant leur parcours sur un chemin.

Un convoi étant formé, on conçoit que la charge varie pour chaque pente ou contre-pente en vertu de l'effet de la gravité.

Soient M' , M'' , M''' , M'''' , les charges qui pour un convoi déterminé correspondent à chaque pente, palier ou rampe.

Le temps pendant lequel chaque charge est appliquée à la machine est

$$\frac{L'}{v'}, \frac{L''}{v''}, \frac{L'''}{v'''}, \ldots$$

et la charge moyenne est évidemment :

$$\frac{\frac{M'L'}{v'} + \frac{M''L''}{v''} + \frac{M'''L'''}{v'''} + \ldots}{\frac{L'}{v'} + \frac{L''}{v''} + \frac{L'''}{v'''} + \ldots}$$

Si le parcours dont il s'agit se compose de pentes et de contre-pentes placées entre deux points de niveau, on trouvera toujours que la charge moyenne de la machine sur ces pentes sera plus forte qu'elle le serait sur un plan de niveau.

Quand on arrête un tracé, il y a lieu d'examiner toutes ces questions pour reconnaître celui qui doit être préféré ; on conçoit que le problème varie pour un chemin de voyageurs et un chemin de marchandises. Dans le premier cas la vitesse est un élément très important, pour le deuxième au contraire c'est la charge qu'il faut surtout considérer.

Des moyens de gravir les rampes sur les chemins de fer

Sur une rampe au-dessous de 5 millimètres par mètre, on s'arrange en général de manière à réduire assez le convoi pour pouvoir la gravir sans inconvénient sans autre secours qu'une pression un peu plus forte dans la chaudière.

Sur une rampe entre 5 et 10 millimètres, il faut compter au moins quelques fois sur une machine de renfort, et il faut autant que possible avoir à proximité d'une pareille rampe une station dans laquelle stationnent des machines de secours et de renfort.

Sur une rampe supérieure à 10 millimètres, il faut employer les machines fixe.

Tous ces moyens présentent des inconvénients qu'il est facile de concevoir.

Nous allons parler maintenant de l'avenir probable des locomotives et des modifications et améliorations qu'elles ont déjà reçues et qu'elles recevront probablement encore.

Nous rappellerons d'abord les formules qui lient la pression et la température pour de la vapeur d'eau à son maximum de densité.

La pression p sera exprimée en Kilogrammes par centimètre carré

La température t en degrés du thermomètre centigrade.

Cela posé on a :

1° pour les pressions moindres que l'atmosphère au-dessous de $1^{K},0335$ par centimètre carré :

$$\left\{\begin{array}{ll} \text{Formule de southern} & p = 0{,}0034542 + \left(\dfrac{46{,}278 + t}{145{,}360}\right)^{5{,}13} \\ \text{et} & t = 145{,}360\ \sqrt[5{,}13]{p - 0{,}0034542} - 46{,}278 \end{array}\right\} \quad (1)$$

2° Pour les pressions comprises entre 1 et 4 atmosphères ou entre $1^{K},0335$ et $4^{K},1440$ par centimètre carré :

$$\left\{\begin{array}{ll} \text{Formule de Pambour} & p = \left(\dfrac{72{,}67 + t}{171{,}72}\right)^{6} \\ \text{et} & t = 171{,}72\ \sqrt[6]{p} - 72{,}67 \end{array}\right\} \quad (2)$$

3° Pour les pressions comprises entre 4 et 50 atmosphères ou entre $4^{K},1440$ et $51^{K},6750$ par centimètre carré :

$$\left\{\begin{array}{ll} \text{Formule de Dulong et Arago} & p = \left(0{,}28658 + 0{,}0072003\ t\right)^{5} \\ \text{et} & t = 138{,}883\ \sqrt[5]{p} - 39{,}802 \end{array}\right\} \quad (3)$$

Appelons maintenant μ le volume relatif de la vapeur prise dans un certain état, c'est-à-dire sous une pression et à une température déterminée, $\mu = \frac{1}{d}$, d étant la densité de la vapeur celle de l'eau étant prise pour unité.

μ exprime le rapport du volume qu'occupe la vapeur dans l'état où on la considère au volume d'eau qui lui a donné naissance.

μ exprime encore le nombre de mètres cubes qu'occuperait un mètre cube d'eau réduit en vapeur à la température et sous la pression que l'on considère.

Ainsi pour de la vapeur à 100° sous la pression atmosphérique on sait que la densité est $\frac{1}{1700}$; celle de l'eau à son maximum de densité étant prise pour unité ; donc $\mu = 1700$, donc un mètre cube d'eau à cette température 100° et sous la pression atmosphérique $p = 1^{K},0335$ occupera un volume de 1700 mètres cubes.

Cela posé on a :

D'après la loi de Mariotte pour deux vapeurs dont les températures, la pression et le volume relatif sont représentés par t, p et μ pour l'une et par t', p' et μ' pour l'autre

$$\text{quand} \quad t = t' \qquad \frac{\mu}{\mu'} = \frac{p'}{p} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

et d'après la loi de Gaylussac, on a :

$$\text{quand} \quad p = p' \qquad \frac{\mu}{\mu'} = \frac{1 + 0{,}00364\ t}{1 + 0{,}00364\ t'} \quad \ldots . (5)$$

En combinant ces deux formules (4) et (5), on peut, connaissant le volume relatif μ' de la vapeur sous une certaine pression p' et à une certaine température t', calculer le volume relatif μ de la même vapeur et sous une pression p et à une température t.

En effet soit pour un instant μ'' le volume relatif de la même vapeur à la pression p et à la température t', on aura, en vertu de la relation (5)

$$\frac{\mu}{\mu''} = \frac{1 + 0{,}00364\ t}{1 + 0{,}00364\ t'}$$

et en vertu de la relation (4)

$$\frac{\mu''}{\mu'} = \frac{p'}{p} \qquad \text{d'où} \qquad \mu'' = \mu' \cdot \frac{p'}{p}$$

et

$$\mu = \mu'' \times \frac{1 + 0{,}00364\ t}{1 + 0{,}00364\ t'}$$

ou

$$\mu = \mu' \frac{p'}{p} \times \frac{1 + 0{,}00364\ t}{1 + 0{,}00364\ t'} \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

Or, si nous faisons sans cette valeur de μ

$$p' = 1\ K\ ,335 \qquad t' = 100° \qquad \mu' = 1700$$

et que nous y mettions ensuite à la place de p et de t les valeurs qui correspondent aux différents états de la vapeur restant toujours à son maximum de densité, valeurs de p et de t qui nous sont données par les formules (1) (2) et (3), nous trouverons les valeurs de μ correspondantes.

On aura donc pour calculer les différentes valeurs de μ pour de la vapeur à son maximum de densité, la formule

$$\mu = 1700 \times \frac{1{,}0335}{p} \times \frac{1 + 0{,}00364\ t}{1{,}364} = 1287\ \frac{1 + 0{,}00364\ t}{\mu} \quad \ldots\ldots (7)$$

en y mettant pour t et p les valeurs déduites des formules (1), (2) et (3).

Les valeurs de μ calculées d'après cette formule, sont portées dans la troisième colonne du tableau ci-après.

Maintenant Pambour a donné pour la relation directe entre μ et p (les seules quantités qu'il soit indispensable de connaître) la formule

$$\mu = \frac{1}{n + q\ R} \qquad R = 10\,000\ p \qquad n = \frac{1421000}{(10)^{10}} \qquad q = \frac{471}{(10)^{10}}$$

ou

$$R = \frac{(10)^{10}}{471\ \mu} - 9017 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

C'est d'après cette formule (8) qu'ont été calculées les valeurs de μ données dans la quatrième colonne du tableau ci-après.

Cette formule n'est pas applicable au cas ou R est < 15 000$^{\text{Kil.}}$, mais c'est là un cas qui ne nous intéresse pas.

R étant la pression en Kilogrammes par mètre carré, et p la même pression par centimètre carré on a évidemment

$$R = 10\,000\ p$$

Au moyen des formules ci-dessus on peut former aisément le tableau suivant :

Valeurs de p en Kilogrammes par mètre carré	Temperature in degrees centigrade	Valeurs de μ calculée par la formule (7)	Valeurs de μ calculée par la formule (8)	Valeurs de p en Kilogrammes par mètre carré	Temperature in degrees centigrade	Valeurs de μ calculée par la formule (7)	Valeurs de μ calculée par la formule (8)
1 000	45°,9	15 019		41 000	144°,6	479	482
2 000	59°,6	7 831		42 000	145°,3	468	471
3 000	68°,4	5 356	La formule (8) que donne Pambour n'est pas applicable pour une pression au-dessous de 1500K. Il faudrait la modifier (voir Pambour)	43 000	146°,1	459	461
4 000	75°,1	4 097		44 000	147°,0	449	451
5 000	80°,5	3 329		45 000	147°,8	440	442
6 000	85°,2	2 810		46 000	148°,7	431	433
7 000	89°,2	2 435		47 000	149°,5	423	424
8 000	92°,8	2 152		48 000	150°,3	415	416
9 000	94°,4	1 921		49 000	151°,1	407	408
10 000	99°,0	1 751		50 000	151°,8	400	400
11 000	101°,8	1 604		51 000	152°,6	393	393
12 000	104°,4	1 480		52 000	153°,3	386	386
13 000	106°,7	1 375		53 000	154°,1	379	379
14 000	109°,0	1 284		54 000	154°,8	373	372
15 000	111°,1	1 205	1 178	55 000	155°,5	366	366
16 000	113°,0	1 135	1 116	56 000	156°,2	360	360
17 000	114°,9	1 074	1 060	57 000	156°,9	355	354
18 000	116°,7	1 019	1 010	58 000	157°,6	349	348
19 000	118°,4	969	964	59 000	158°,3	344	342
20 000	120°,1	925	922	60 000	158°,9	339	337
21 000	121°,7	884	884	61 000	159°,6	334	332
22 000	123°,2	847	848	62 000	160°,3	329	327
23 000	124°,6	813	816	63 000	160°,9	324	322
24 000	126°,1	782	785	64 000	161°,5	319	317
25 000	127°,4	754	757	65 000	162°,1	315	312
26 000	128°,7	727	731	66 000	162°,8	311	308
27 000	130°,0	702	707	67 000	163°,4	306	303
28 000	131°,2	679	684	68 000	164°,0	302	299
29 000	132°,4	658	663	69 000	164°,6	298	295
30 000	133°,6	638	643	70 000	165°,2	294	291
31 000	134°,7	619	624	71 000	165°,7	290	287
32 000	135°,8	601	606	72 000	166°,3	287	283
33 000	136°,9	584	589	73 000	166°,9	283	279
34 000	137°,9	569	579	74 000	167°,5	280	276

35 000	138°,9	554	558	75 000	168°,0	277	272
36 000	139°,9	540	544	76 000	168°,6	273	269
37 000	140°,9	526	530	77 000	169°,1	270	265
38 000	141°,8	514	517	78 000	169°,7	267	262
39 000	142°,8	502	505	79 000	170°,2	264	259
40 000	143°,7	490	493	80 000	170°,7	261	256
"				85 000	173°,3	247	241
"				90 000	175°,7	234	228
"				95 000	178°,1	223	216
"				100 000	180°,3	213	206

Il est utile de rappeler encore ici ce que c'est que le calorique latent ou le calorique perdu lorsque l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux.

En appelant calorie la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un Kilogramme d'eau, on se souviendra que pour faire passer un Kilogramme d'eau de l'état liquide à l'état gazeux, il y a une quantité de 550 calories qui est absorbée, qui ne se manifeste pas au thermomètre et qui forme en un mot le calorique latent.

On conçoit dès lors, et le tableau que nous venons de donner le prouve, pourquoi il ne faut pas beaucoup plus de chaleur pour élever la vapeur à une forte pression qu'à une pression moyenne ou même à une faible pression. Il faut en outre considérer que la pression totale dans les locomotives doit toujours être diminuée de la pression atmosphérique, c'est-à-dire de 10 000 $^{Kil.}$ pour avoir la pression effective de la machine ; et que cette réduction constante, quelle que soit la pression, est d'autant plus sensible que la pression est plus faible.

Ainsi : si l'on veut avoir une pression effective de 20 000 dans la machine, il faudra avoir une pression totale de 30 000 et produire par conséquent une température qui d'après notre tableau est de 133° ; pour une pression effective double de la première ou de 40 000, il faudra une pression totale de 50 000 et une température de 151°, c'est-à-dire qu'il faudra par Kilogramme d'eau évaporée pour le premier cas 133 + 550 calories = 683 calories et pour le 2e cas 151 + 550 calories = 701 calories.

On comprend dès lors pourquoi et combien il importe d'employer de la vapeur à une forte pression ; mais comme d'après la théorie que nous venons de développer la pression que prend la vapeur d'eau dans le cylindre dépend de la charge que la machine est appelée à tirer, on sera souvent amené malgré soi, avec les machines actuelles, à n'employer la vapeur qu'à une faible pression, et il y aura perte réelle de force ou de combustible.

Ainsi : sur le chemin de Corbeil nous avons vu dans notre première conférence que d'après nos formules la pression est de 32 542 Kilog pour un convoi de 10 voitures et pour un convoi moindre elle est au-dessous de trois atmosphères.

L'invention des machines à détente fixe qui commencent à être employées en Angleterre, en Belgique et en France remédie en grande partie à cet inconvénient : la vapeur peut alors agir avec une pression plus considérable. Dans les machines construites d'après ce système la course du piston par l'effet direct de la vapeur est les $\frac{65}{100^{e}}$ ou les $\frac{75}{100}$ de la course totale, le mouvement s'achève par l'effet de la détente ; mais ces machines ont à leur tour l'inconvénient de ne pas pouvoir

traîner des charges aussi fortes que les premières, en admettant que l'on ne dépasse jamais dans les unes comme dans les autres, le maximum de pression de 50 000 Kilog.

L'inconvénient que nous avons signalé n'est d'ailleurs pas entièrement annulé par ce système, puisqu'on est obligé de diminuer la tension de la vapeur pour les faibles efforts et que si l'on a par exemple sur un chemin une rampe de 5mm à gravir il faut s'arranger pour que la machine puisse la monter avec une pression totale de 50.000^{K} et se résigner ensuite à marcher sur le surplus du chemin avec une pression moindre. Une machine à détente variable serait la véritable solution du problème, car elle permettrait d'employer toujours la vapeur à 5 atmosphères ; le mécanisme ferait arriver de la vapeur sur le piston que pendant les ⅘, les ¾, les ⅔ de la course quand les rampes seraient plus faibles et en augmentant ainsi la détente : au fur et à mesure que la rampe deviendrait plus douce il s'arrangerait de manière à employer toujours sa vapeur à 5 atmosphères. Des machines de se genre s'exécutent dans ce moment en Angleterre chez M. Stephenson, il y en a eu de fabriquées en France par M. Meyer, qui ont été employées sur le chemin de Bâle à Strasbourg.

Nous dirons enfin quelques mots sur les différents combustibles que l'on peut employer sur les chemins de fer.

On appelle puissance calorifique d'un combustible la quantité de chaleur qu'il est susceptible de développer.

On appelle calorie la quantité de chaleur qu'il faut pour élever d'un degré centigrade un Kilogramme d'eau.

Un Kilogramme de coke peut développer 7000 calories.
. . . . . de houille . . . . . 6440 . . . . .
. . . . . de charbon de bois . . . . 6000 . . . . .
. . . . . de bois séché à l'air . . . 2945 . . . . .
. . . . . de tourbe . . . . . 1500 . . . . .

On voit immédiatement que la tourbe ne donne pas assez de chaleur. Le bois séché a été employé dans quelques chemin (de) fer d'Allemagne où il était à très bas prix ; mais outre l'inconvénient de donner peu de chaleur il produisait des flammèches qui pouvaient donner lieu à des accidents.

Le charbon de bois est cher et d'un emploi peu avantageux.

Enfin le coke est préféré à la houille parce qu'il fournit plus de chaleur et que la houille produit une odeur désagréable et des gaz sulfureux qui détériorent la machine.

Dans tous les cas les meilleurs foyers n'utilisent que 0,50 à 0,60 de la chaleur développée.

D'après la puissance calorifique que nous venons de donner pour le coke, et en en prenant la moitié d'après l'observation précédente on trouverait qu'un kilogramme de coke peut vaporiser $5^{K},38$ d'eau ; on obtient dans les machines entre 5,6 et 7 Kilogrammes ; mais il fut observer que l'eau consommée et que l'on mesure dans le tender est plus grande que l'eau vaporisé comme il a été dit précédemment.

Tous les détails donnés ci-dessus sur les locomotives sont extraits de l'ouvrage de M. Pambour intitulé Traité théorique et pratique des machines locomotives.

On peut consulter pour les détails sur la construction, l'entretien et la manoeuvre des locomotives l'ouvrage de MM. Flachat et Petiet intitulé Guide du mécanicien conducteur de machines locomotives.

Description des travaux du chemin de Fer de Paris à Orléans

La voie est la partie spéciale d'un chemin de fer elle est disposée aujourd'hui à peu près d'une manière uniforme.

La voie se compose de deux pièces de fer appelée rails posés et maintenus sur des supports en fonte, qu'on distingue indistinctement sous le nom de coussinets, sabots, supports, ou chairs. Les sabots sont fixés sur des pièces de bois transversales espacées environ de 1m et reposant sur le sol du chemin par l'intermédiaire d'une couche de sable ou de pierres cassées qui prévient l'enfoncement de la traverse, lorsque par l'effet de l'humidité le sol devient mou et peu résistant ; elles ont en outre l'avantage, d'envelopper la traverse complètement, de la maintenir en tous sens et de contribuer ainsi à leur conservation d'une part et à leur solidité de l'autre.

Les couches portent le nom de balattre,(*) l'épaisseur est de 0m,45 à 0m,50. Il est avantageux de les former de sable pour bien asseoir les traverses. Il convient que le sable ne soit pas trop terreux, c'est-à-dire mêlé à une grande quantité de terre, car les traverses seraient alors à peu près comme placées simplement sur le sol et le balustre n'offrirait pas à la traverse l'espèce de fondation solide qu'il est destiné à lui procure. Il n'est pas bon non plus que le sable soit parfaitement pur, parce que dans cet état les grains ont trop de facilité de rouler les uns sur les autres et partant la couche n'offre pas une fondation assez solide et assez stable.

Quand le sable est trop cher on lui substitue des pierres cassées, mais les traverses ne sont pas aussi bien posées sur les balattres ainsi construits que sur le sable. Les pierres cassées ont le seul avantage de donner un prompt écoulement à l'eau ; leur inconvénient est, quand il y a un tassement de ne pas se prêter aussi bien que le sable au relèvement de la traverse.

La partie la plus importante de la voie est le rail, sa forme varie dans chaque chemin de fer. Le rail doit avoir une surface de roulement suffisante pour que la roue ne soit pas mangée et la largeur de cette surface varie entre 0,05 et 0,06 ; pour le chemin d'Orléans ; on a adopté la moyenne 0,055. Le rail doit avoir une certaine hauteur pour ne pas fléchir entre deux appuis sous la charge de la roue. On sait que pour cela la meilleure forme à donner à la section transversale est celle d'un double *T* ou d'un double champignon. Sauf quelques variations dans les dimensions, cette forme paraît aujourd'hui, généralement adoptée. Cependant au chemin de fer de Paris à Versailles (rive gauche) on a adopté la forme représentée par la figure (2). Il est facile de voir que les rails de la 1ère forme peuvent se retourner de manière différentes, en offrant toujours même surface de roulement et même base tandis que les rails de la 2ème forme ne peuvent servir que d'un seul côté, ils ont encore l'avantage de poser dans le coussinet sur une large base ce qui concourt à une bonne assiette.

Les rails en forme de double *T* ont été employés au chemin de fer de Paris à Versailles (rive droite), mais avec une surface de roulement de 0,06 ; la saillie de la partie supérieure sur la partie moyenne nous a paru un peu trop prononcée et de nature à favoriser l'usure du rail sur ses deux arêtes ; tel est le motif pour lequel au chemin d'Orléans on a réduit la surface à 0,055 et augmenté l'épaisseur au milieu.

(*) Il s'agit du ballast. Dans le manuscrit, le terme *balattre* est utilisé, mais, malgré mes recherches, je n'ai pu le retrouver dans les dictionnaires techniques de l'époque.

Le rail tel qu'on l'employait autrefois, généralement présente une surface plate. Depuis peu on lui donne un léger bombement dont l'effet est de ramener la pression exercée par la roue au centre du rail ; ce qui l'use moins vite. En outre la ligne brillante que le frottement trace sur le rail devient à peu près continue, tandis que sur les rails plats cette ligne paraît tantôt d'un côté tantôt de l'autre. La marche du convoi paraît devoir être plus douce avec le bombement

La flèche du bombement est de 0,0014
Le rayon de la surface bombée 0,1647
La corde d'environ 0,045
La hauteur du rail (non compris les deux bombements est de 0^{m},11

Le poids des rails est allé toujours en augmentant ; on est arrivé à 30 Kilog, c'est le poids que nous avons adopté ; il a a déjà été dépassé en Angleterre ; au chemin de Rouen, il est de 35 Kilo.

Le prix du rail varie de 30 à 33^{f} les 100 Kilog. à l'usine ; mais le transport sur les chantiers augmente beaucoup le prix. Pour le chemin d'Orléans, on a pris le fer en grande partie à Decazeville il vient alors par Bordeaux et Nantes. On en a pris aussi à Alais ; il descend le Rhône fait le tour de l'Espagne pour venir à Nantes prendre la Loire jusqu'à Orléans. Ces longs trajets portent le prix de 100 Kil. à 39 et 40 francs. Enfin on a pris aussi une partie des rails au Creusot.

Les rails se placent bout à bout : il faut pour cela qu'ils soient bien coupés d'équerre, que les têtes soient bien nettes de toute bavure et dressées au burin et à la lime ; car l'emploi du marteau altérerait la forme de la section transversale, chaque portion doit être affranchie des 2 côtés à une distance suffisante des bouts écrus pour que les deux extrémités soient parfaitement saines.

Il importe que les rails soient bien construits avant de sortir de l'usine ; pour éviter de les reprendre à froid sur les chantiers, ce qui donnerait lieu à une main d'oeuvre très coûteuse.

La longueur d'un rail est de 4^{m},50. On accorde une tolérance de 0,04 en moins pour un petit nombre que l'on place dans les courbes.

Le fer doit être de bonne qualité, on n'entend pas par là qu'il offre les mêmes propriétés que celui qu'on emploie dans les ponts suspendus, par exemple, il ne lui faut pas évidemment une grande malléabilité, mais il doit être dur, compacté, non cassant à froid, parfaitement soudé, sans stries ni gerçures et sans défaut autant que possible.

Avant d'être employé le rail est soumis à une épreuve qui consiste à le poser sur deux appuis de 0,08 de largeur, séparés par un intervalle de $1^{m}25$ et le charger au milieu d'un poids de 10 000 Kilog. Il ne doit pas conserver d'altération après l'épreuve.

Les coussinets sont en fonte de 1ère ou $2^{è}$ fusion ; on les distingue en coussinets de joints et coussinets intermédiaires. Les premiers ont 0^{m}.14 et les seconds 0^{m}.10 de largeur.

Leur poids est, pour un coussinet de joints . . . . . $12^{K}80$
pour un coussinet intermédiaire . . . . . $9^{K}20$

Le contact du rail avec les joints ou paroir du coussinet doit avoir lieu exactement sur toute l'étendue de la surface contre laquelle il doit porter

La fonte doit être tendre et douce à la lime, à grains serrés et homogènes, sans défaut.

Les surfaces doivent être nettes ; les bords ébarbés, les jets et les coutures abattus à la lime.

Le prix, pour de la fonte de 1ère fusion, varient y compris les transports de 30 à 32 fr. les 100 Kilog. On aurait une diminution avec des fontes de seconde fusion, mais peut-être moins de solidité et plus de chance de casse.

Les coussinets sont fixés sur les les traverses au moyen de chevillettes en fer de 0m14 de longueur, non compris la tête, sur 0,018 de diamètre. La tête a 0,024 de diamètre et 0,0113 d'épaisseur, une chevillette pèse de 27 à 30 grammes.

Les chevillettes doivent être en fer de première qualité, doux et non cassant. La tête doit être refoulée dans la masse et non rapportée, car, par suite des secousses que les traverses ont à subir, elle partirait facilement. Les bonnes chevillettes ne doivent pas casser à l'épreuve quand on les fléchit de 45° – Prix des 100 Kil. de 60 à 65 f.

Pour maintenir le rail dans le coussinet, établir un contact bien intime de la surface latérale du rail et de la roue du coussinet on chasse à coup de masse un coin de bois dans l'intervalle laissé pour l'introduction du rail dans le coussinet.

Les coins sont en bois de chêne, bien sec, bien sain, sans aubier.

Les coins pour sabots de joints ont 0,30
pour sabots intermédiaires . . . . . 0,25 } de longueur

On les fabrique à la machine avec une grande précision ; Un coin vaut à peu près 0,20e ; il est légèrement conique, il faut qu'il porte sur toute la longueur du sabot.

Les traverses sont en chêne de bonne qualité, grossièrement équarrie. Il faut éviter autant que possible l'emploie du bois blanc parce qu'il pourrit facilement et qu'il ne retient pas la chevillette avec assez de force. Cependant, lorsque la localité où l'on se trouve le chêne est trop cher et que le bois de sapin par exemple est d'un prix peu élevé il peut y avoir lieu à employer ce dernier. Il serait important en pareille circonstance de connaître des procédés pour donner au bois une certaine dureté, et lui assurer une certaine durée. Il y a des procédés en Angleterre, en France ; celui de Boucherie paraît devoir être très bon mais n'a pas encore reçu d'applications en grand.

Une traverse de joint modèle a :

2m.45 de longueur ; 0,30 de largeur et 0,15 d'épaisseur, cube 0m,11

Une traverse intermédiaire modèle a :

2m.45 de longueur ; 0,25 de largeur et 0,15 d'épaisseur, cube 0m,09

On admet des tolérances :

Sur la longueur : de 0,25 en plus ou en moins.

Sur la largeur : de 2 centimètres en plus et 7 centimètres en moins pour les traverses intermédiaires, et pour les traverses de joint de 10 en plus et rien en moins.

Sur l'épaisseur : de 2 cm en plus ou en moins.

Le cube total moyen de la fourniture totale ne doit pas être dépassé, afin que l'entrepreneur ne puisse pas vous jeter dans un cube exagéré.

Les bois pour les traverses du chemin de fer fer d'Orléans ont été livrés en partie sur les ports de la seine entre Paris et Corbeil et sur le port de la Loire à Orléans au prix de 73 f il faut y ajouter

10 ^{f} pour le transport sur les chantiers, le débitage, et le sabotage par mètre cube, ce qui fait par mètre 83 ^{f}, à Paris on a payé un peu plus cher pour la ligne de Corbeil.

Les prix du sabotage et des autres mains d'oeuvre de la pose tendent à baisser au fur et à mesure que des ouvriers se forment et deviennent plus exercés et plus habiles pour les différents travaux.

Sabotage. — Cette opération est la base d'une bonne voie : elle doit être faite avec soin et précision.

Les supports doivent être posés avec un gabarit, bien exactement à la distance et à l'inclinaison voulue dans une même ligne.

La surface sur laquelle porte le support doit être parfaitement saine sans aubier et bien dressée pour que le support porte sur toute sa base. On donne aux sabots une inclinaison de $\frac{1}{20}$ pour ramener les voitures vers le centre de la voie. Il faut autant que possible supprimer les entailles et avoir une surface bien dégagée où l'eau ne puisse séjourner.

Les chevillettes doivent être posées avec soin. Leur trou est percé à la vrille de manière qu'elles entrent à serre, sans trop de force cependant, pour ne pas fendre le bois. C'est pour cette raison aussi que leur tranchant doit être d'équerre au fil du bois.

Pose de la voie. On ne donnait autrefois que 1^{m}44 de largeur entre les bords intérieurs des rails d'une même voie. Cette distance égale à celle des rebords des roues ne suffisait plus pour les courbes où il fallait augmenter cette largeur et l'augmenter d'autant plus que le rayon de la courbe était plus petit.

On s'est débarrassé de l'inconvénient d'avoir des gabarits divers et des frottements considérables en adoptant l'écartement uniforme de 1,45.

Dans les changements de voie, il importe de réduire les voies à la largeur juste 1,44 des rebords des voitures.

Dans les courbes on exhausse le rail extérieur ou du plus grand rayon pour combattre et réduire les efforts de la force centrifuge par le poids des voitures.

L'exhaussement est de :

10 millim. pour les courbes de 1.000 à 1.200^{m} de rayon.
8 . . . . . 1.500 de rayon.
4 . . . . . 2.000 . . . . . .
3 . . . . . 3.000 . . . . . .
2 . . . . . 6.000 . . . . . .

Pose des traverses. Les traverses doivent toujours être posées d'équerre à l'axe de la voie. Différents systèmes ont été suivis pour leur espacement. Sur le chemin de St Germain elles sont espacées de 1,125 et offrent ainsi trois points d'appui intermédiaires. Dans cette disposition, si les extrémités ne sont pas parfaitement soutenues elles peuvent fléchir et donner lieu à des portées à faux qui se manifestent lors du passage d'un convoi par le jaillissement d'eau ou de sable. Sur le chemin d'Orléans on a préféré adopter, surtout dans les mauvais terrains, les traverses intermédiaires espacées de 1^{m} ce qui ne donne que 0,75 pour les extrémités d'une portion de rail.

L'économie seule a engagé à employer dans les parties en déblais 9 appuis intermédiaires espacés de 1,25 ce qui donne 1^{m} pour les longueurs des extrémités. Il faut laisser pour la dilatation un petit jour entre 2 parties successives. 9^{mm} suffisent quand on opère à la température de 10 à 15°.

Dans les courbes il importe d'avoir des rails plus courts pour la ligne du côté de la concavité. On leur donne 2 ou 3 centimètres de moins et on les interpose entre les rails de 4.50 — Quand les courbes sont à petit rayon il faut courber les rails avant la pose ; mais avec un rayon de 1000 et au-dessus c'est inutile, les coins suffisent pour leur donner la légère flexion qui leur convient, pour asseoir les traverses il ne faut pas les frapper trop fort afin d'éviter l'arrachage des chevillettes ; c'est en refoulant le sable par dessous avec des pioches anglaises qu'on obtient la solidité désirable. Pour s'assurer qu'une traverse est bien calée, on décoince le rail et on voit si la traverse ainsi isolée, c'est-à-dire non maintenue ou supportée par le rail ne tasse pas.

Du ballast. Les fig. 3. 4. 5 et 6 font connaître les profils adoptés dans le cas d'un ballast en sable ou en pierres cassées, dans la double circonstance du déblai et du remblai, le bombement des surfaces entre les voies de fer n'a pas pour objet, ce qui serait mauvais, de faire couler l'eau sous les rails, le ballast est trop perméable pour cela, mais d'avoir un petit excédent de matériaux formant approvisionnement.

Dans l'entretien, il faut relever et réparer sans cesse dès qu'une déformation se produit pour éviter les grandes réparations toujours coûteuses, et dangereuses pour le matériel.

Afin de les conserver, les traverses et même les coins doivent toujours être recouverts de sable.

Quand on refoule le sable sous les traverses il faut veiller à ce qu'elles soient fortement consolidées sous les sabots et aux deux extrémités et non dans le milieu.

Les coins doivent être enfoncés avec soin et sans forcer de peur de faire éclater ou de faire sauter les jours du coussinet.

Prix d'un mètre courant de voie. Il y a dans les dépenses qu'entraîne la construction d'une voie de fer une partie à peu près constante que nous allons évaluer. C'est celle relative à l'établissement des rails sur un terrain convenablement préparé.

Fourniture de matériaux.

Les traverses par mètre courant ont un cube de 0,10 ; en estimant le prix du mètre cube 83^{f}, y compris les frais de sabotage, on trouve . . . . . $8^{f}.50$

$60^{Kil.}$ de rails à 0,3886 le Kilog. donnent par mètre courant . . . . . $23^{f}.3$

20^{K} 66 de fonte pour coussinet à 0,30555 le Kilog . . *ies* 6.3

1^{K} 14 de chevillettes à 0,6.3110 le Kilog. . . . . *ies* 0.9

2 coins en bois 0.42

Ce qui donne en somme . . . . . ***39 f .05***

pour fournitures de matériaux qui entrent dans 1^{m} courant de voie.

Les prix donnés ci-dessus sont les prix moyens de chemin d'Orléans.

Main d'oeuvre, Le transport de $200^{Kil.}$ de matériaux (nécessaire pour la confection de 1^{m} courant de voie) des ports de la Loire et de la Seine aux chantiers de dépôts sur la ligne, à une distance réduite d'environ 10^{l} est revenu eu égard aux mauvais chemins à . . . . . $2^{f}.00$

La pose de la voie et le transport par wagon des chantiers de dépôts aux points de l'emploi exigent 1.65

Il faut pour compléter ces dépenses ajouter pour location de chantier, frais de réception des matériaux, surveillance du travail, poses provisoires, relèvement de la voie pendant les premiers mois qui suivent la pose et pendant les transports provisoires 2.30

Total général . . . . . ***$45^{f}.00$***

Ce qui fait par *Kilomètre* de double voie . . . . . ***90.000^{f}***

Prix du Ballast. Le prix du sable est très variable ; il passe de 2 à 8^{f} et même quelquefois à 10^{f}.

En adoptant en moyenne 5^{f} pour le sable ou pour la pierre cassée, et en admettant $4^{m.c}$ de ces matériaux par mètre courant eût égard aux relèvements qui deviennent nécessaires dans les commencements de la circulation on pourra prendre . . . . . 90 + 20 = 110^{f} 00 pour prix d'un mètre courant de double voie.

Mais en outre il y a des voies de service pour les gares d'évitement, pour les gares de motrices de secours, pour les gares extrêmes, pour les ateliers et dépôts de machine, pour les gares de marchandises ; en les évaluant à $\frac{1}{20}$ de la longueur, ce qui fait par mètre courant . . . . . 6^{f} 00

on trouve . . . . . 116^{f} 00 pour prix de mètre courant de voie.

Dans une estimation relative au chemin du nord on adopte le chiffre 125^{f} 00

D'après l'expérience des chemins anglais, et eu égard à la différence des prix pour la main d'oeuvre et les matières premières qui peuvent exister en France et en Angleterre, pour peu qu'on augmente un peu le poids des rails, la force des coussinets, les dimensions des traverses, on arrivera facilement à ce chiffre ; on peut admettre que le prix au mètre courant de double voie, avec le ballast, reviendra de 115 à 125 francs. On ne s'écartera guère de ces limites que dans des circonstances exceptionnelles.

5e Leçon

Une remarque à faire sur l'établissement de la voie, c'est qu'on prolonge les traverses de $0^{m}75$ environ de chaque côté et en dehors de la voie, ce qui peut, au premier abord, paraître superflue ; mais cette disposition contribue beaucoup à la solidité du chemin, en étendant la base sur laquelle repose la voie. L'épaisseur de la traverse doit être assez grande, pour que la chevillette soit entièrement plongée dans le bois, et ne ressorte pas à la surface intérieure de la traverse. Il faut aussi que l'épaisseur de la traverse soit suffisante pour s'opposer à la flexion ; mais la première de ces conditions étant remplie, la seconde l'est aussi généralement.

On doit sur toute ligne de chemin de fer exiger que les convois qui vont dans un sens se maintiennent toujours sur la même voie, et que ceux qui vont en sens contraire marchent sur l'autre voie. Cependant on est toujours obligé d'établir de distance en distance des communications entre les deux voies ; ces communications sont d'ailleurs indispensables également aux deux extrémités du chemin.

Nous parlerons ici des différents moyens employés pour établir ces communications.

La plate-forme tournante sert à faire passer une locomotive ou voiture quelconque d'une voie sur une autre qui fait avec la première un angle quelconque. Cet appareil consiste en une plaque circulaire en fonte sur laquelle sont fixés des rails au moyen de boulons à tête fraisée. Parfois ces rails font corps avec la plaque, et sont alors en fonte, mais cela a un inconvénient, c'est que la plaque est fort compromise lorsque les rails sont brisés.

Cette plaque est supportée à son centre par un pivot sur lequel elle tourne. (fig. 7).

Outre ce pivot, il y a des roulettes placées à une certaine distance du centre et sur lesquelles porte une espèce de rail circulaire fixé au-dessous de la plaque ; ces roulettes tournent, en outre, sur une voie en fonte également circulaire.

Les rails de la plaque étant placés en face de ceux de la voie sur laquelle est la voiture, on fait avancer cette dernière sur la plaque, et on fait alors tourner tout le système jusqu'à ce que la voiture se trouve en face de la voie où on veut l'engager. On n'a plus alors qu'à la pousser pour la faire sortir de la plaque. On vois que pour cette manoeuvre il suffirait de mettre sur la plaque une ligne de rails, mais on abrège les opérations en mettant deux lignes de rails à angle droit. En effet, si on doit faire changer de voie tout un convois, on n'a pas besoin après avoir opéré sur une voiture, de ramener la plaque dans sa position primitive, les seconds rails se trouvent dans la position nécessaire pour recevoir la seconde voiture. Il est clair que ceci n'a lieu que lorsque les deux voies sont à angle droit.

On est obligé, quand on met deux systèmes de rails, de les interrompre à la croisée pour laisser passer les rebords des roues, on laisse 0^{m} 05 de jeu.

Il y a autour de la plaque tournante un petit mur circulaire. On le faisait autrefois en pierre ; mais les chocs occasionnés par l'arrêt brusque de la plaque, quand on fermait le taquet destiné à la retenir dans la positions nécessaire, ces chocs faisaient fendre les pierres. On y a substitué un petit mur formé par une plaque de fonte cylindrique.

Il y a des plate-formes tournantes pour locomotives et d'autres pour wagons diligence etc. Les premières sont plus grandes.

Elles ont 4^{m} 20 de diamètre. Les secondes n'ont que 3^{m} 40.

La plaque en fonte n'est pas entièrement pleine, elle est évidée dans les parties qui ne supportent pas de poids. Ces vides sont couverts par des plaques de fonte très minces ou par des planchers avec de la tôle par dessus, ou simplement par des planches. La fonte ou la tôle sont indispensables pour les plate-formes qui servent aux locomotives, parce que le feu qui est tombé pourrait brûler le bois.

Les plate-formes tournantes pour locomotives avec leurs croisillons, leur cuve d'entourage, leur chariot et la plaque proprement dite contenant 9000^{K} de fonte et 700 de fer forgé coûtent, rendues

conduites sur place de 6 000 à 6 500^{f} ; celles pour voitures exigent 4 à 5 000^{K} de fonte et coûtent de 3 à 4 000^{f}.

Les plate-formes sont nécessaires pour le chargement des chaises de postes, des chevaux, et en général de tout ce qui ne peut pas se charger latéralement. On dispose des plate-formes contre un petit mur assez élevé au-dessus de la voie pour que les chaises de poste arrivent au niveau du chariot sur lequel on les charge.

La plate-forme présente des inconvénients : si l'on a un convoi entier à faire passer d'une voie sur l'autre, il faut répéter un grand nombre de fois la manoeuvre et cela prend beaucoup de temps.

On a donc été obligé d'avoir recours à un autre système et on a employé le changement de voie. Il consiste en une partie de voie courbe *AB*, qui va de l'une à l'autre des deux voies que l'on veut mettre en communication, de manière à faire avec toutes deux un angle fort aigu. Les rayons de ces courbes ont 400 ou 500^{m}, et on y marche généralement à faible vitesse.

Il est nécessaire d'avoir aux points *A* et *B* une disposition qui permette au convoi de continuer sa route sur la même voie ou de passer sur l'autre voie. C'est ce qu'on obtient au moyen des aiguilles mobiles.

Voici le système employé généralement. (fig. 8). Les parties *EF* et *GH* des rails sont mobiles autour des centres *E* et *G*. Lorsqu'un convoi arrive en *B,* il prendra la direction *BB′* ou *BB″* selon que les aiguilles seront dans la position *EF*, *GH* ou dans la position *EF′*, *GH′*. Il suffit pour le comprendre d'examiner la figure. Pour mettre les aiguilles dans une position convenable, on peut les fixer sur une traverse qu'on fait mouvoir au moyen d'une manivelle.

Il y a des systèmes de détails qui sont plus commodes les uns que les autres. Ils sont construits toujours d'après le principe précédent ; un contrepoids placé en *P* sur un bras de levier incliné force les aiguilles à rester dans la position *EF* . *GH* sur la voie principale de sorte qu'un convoi qui vient de *B* prend toujours la route *BB′′*. Si un convoi vient dans le sens *B′′B*, il trouve la voie bonne, et s'il vient, suivant la direction *B′B* il forcera les aiguilles à s'ouvrir pour le laisser passer, et après son passage les aiguilles reprendront leur position.

Ainsi la voie est convenable et peut être parcourue soit suivant la direction *BB″*, ou *B″B*, ou entre *B′B* ; il n'y a que pour aller suivant la ligne *BB′* que l'aiguilleur est nécessaire ; or on peut s'arranger de manière à ce qu'on ait rarement à marcher dans cette direction là.

Lorsque deux voies se croisent on est obligé de disposer les rails d'une manière particulière. Dans la figure ci-jointe (fig. 9) tous les rails en noir appartiennent à l'une des voies et les autres à la seconde. Les parties *a a′ b b′* sont ce qu'on appelle des contre-rails.

Le contre-rail *a a′* s'opposerait à ce que la roue de droite d'une voiture allant dans le sens cd sur la voie noire ne s'engage dans le vide *e f*. Quand les rails sont ainsi très rapprochés on les fixe sur un même sabot.

Il faut, sur une longue ligne, combiner la distribution de ces changements de voie de manière à desservir tout et à les rendre les plus rares possibles. Sur le chemin d'Orléans il y a un changement de voie à peu près à chaque station intermédiaire, afin d'établir de distance en distance des communications entre la voie d'allée et la voie de retour. Les règlements exigent que les voitures qui vont sur une même voie aillent tous dans le même sens. Cependant cela n'est pas toujours possible ;

on conçoit en effet que si un convoi est forcé de s'arrêter sur la voie *AC* (fig. 10), et qu'il appelle à son secours une locomotive qui vient dans le sens *DB*, cette dernière sera obligée d'abord de poursuivre au-delà de *B* pour reconnaître en quel point est le convoi en détresse et ensuite de revenir changer de voie en *B* ; elle suivra donc la voie *DB* à rebours.

Les machines qui desserviront le chemin d'Orléans n'iront que jusqu'à Étampes, et il y aura entre paris et Étampes un dépôt ; de sorte qu'il y aura des machines toutes les huit lieues.

Ces remises pour une locomotive se composent d'un hangar *A* mis en communication avec la voie principale au moyen d'un embranchement *AB* sur lequel est une plaque tournante *C*. Cette plate-forme tournante permet aux locomotives d'être disposées de manière à aller dans les deux sens. Il y a aussi une grue hydraulique qui sert à alimenter les machines. Cette grue hydraulique est simplement une conduite en communication avec un réservoir d'eau et qui amène l'eau au-dessus du tender de la machine. Il est bon de faire remarquer à ce sujet qu'il importe d'avoir toujours de l'eau de bonne qualité. Il y a des eaux qui déposent beaucoup de sels de calcaire qui détériorent promptement les machines.

Aux stations intermédiaires, il est nécessaire d'avoir des trottoirs, afin que les voyageurs puissent seulement monter dans les voitures et en descendre. Sur quelques chemins on a fait ces trottoirs semblables à ceux des gares principales c'est-à-dire à un mètre au-dessus du sol de manière à pouvoir entrer de plein pied du trottoir dans la voiture ; mais comme ces trottoirs coûtent assez cher à établir on leur donne la longueur seulement d'un convoi. Cette disposition fait perdre du temps parce-que le machiniste n'étant pas maître d'arrêter au moment précis où le convoi est devant le trottoir, il est obligé d'y arriver par des oscillations successives ou bien de ralentir la vitesse assez longtemps avant la station. Sur le chemin d'Orléans, on a remplacé les trottoirs par des espèces de banquettes de 0,25 à 0,30 de hauteur qui, s'établissant à meilleur compte, peuvent avoir une plus grande longueur et nous paraissent suffire à tous les besoins des voyageurs.

C'est surtout aux abords et à l'intérieur des gares extrêmes qu'il importe de bien disposer les voies et les changements de voie. Voici les dispositions adoptées à la gare de Paris qui est en tête du chemin d'Orléans.

Remarquons d'abord qu'un convoi est formé de trois espèces de voitures qui sont placées dans un ordre où nous allons les indiquer.

1° Les wagons chargés des marchandises et des bagages, compris sous le nom d'articles de messagerie

2° Les diligences et wagons portant les voyageurs.

3° Les chaises de poste qui sont placés sur de petits chariots spéciaux.

Lors du départ, lorsque le convoi est en *DD′* (fig. 11) les wagons de bagages se trouvent donc vers l'extrémité *D′* ; et on a eu soin de placer vers cette extrémité du bâtiment *M*, les salles ou sont déposés les articles de messageries. Les wagons destinés à les recevoir sont donc en face des salles où ils sont en dépôt. Derrière sont les voitures de voyageurs, aussi en face des salles où ceux-ci attendent. Enfin, derrière encore, viennent se mettre la chaise de poste que l'on charge sur les plate-formes tournantes *P*. Tout est ainsi commodément déposé pour le service.

À l'arrivé, le convoi est en *AA′* ; les articles de messageries sont transportés dans les salles où ils doivent être visités par les douaniers ; les voyageurs gagnent facilement la cour *C* où stationnent des voitures ; et les chaises de poste qui vont vers l'extrémité *A* sont conduites aux plate-formes *Q* où on les décharge.

Les parties de voie *RR′* servent à réunir les voitures. Des plaques tournantes mettent en communication toutes ces voies de manière à rendre le service facile.

Les ateliers de construction et de réparation sont à 1 200^{m} de la gare en *N* ; il était nécessaire d'établir des communications entre la gare et ces ateliers : c'est là le but de la voie *EE′*. On voit qu'elle coupe en *Q* la voie d'arrivée : c'est un inconvénient ; on est obligé d'avoir soin de ne traverser cette voie d'arrivée que lorsque aucun convoi n'est en vue.

6e Leçon

Des terrassements

Nous ne traiterons ici que les questions qui se rattachent directement à la construction des chemins de fer. — Un soin à avoir et qu'on ne saurait trop recommander dans les chemins de fer est d'assainir la voie aussi complètement que possible. Des terrains amollis et détrempés par l'humidité, permettent un enfoncement des traverses qui, lors du passage d'une locomotive, peut occasionner de graves accidents. Les eaux qui s'infiltrent dans les terres favorisent aussi les tassements et les éboulements. Dans la belle saison, quand la terre est bien sèche, on a très peu de rechargement à faire, on en a au contraire après presque toutes les pluies, surtout dans l'origine de l'exploitation.

On comprend dès-lors combien il importe de ne rien négliger pour le parfait assainissement de la voie. — Là est la sûreté du chemin et la sécurité des voyageurs.

De la surface supérieure du sol en remblai.

Les talus sont à 1 et $\frac{1}{2}$ de la base pour 1 de hauteur. (fig. 12).

La surface supérieure du sol sur laquelle repose le ballast est en dos d'âne et bien dressée et lissée afin de faciliter l'écoulement des eaux qui ont traversé le ballast.

Le ballast est dressé et réglé comme il a été dit dans une leçon précédente. Il y a de chaque côté de la voie une petite banquette, laissée pour la circulation des cantonniers. Cette banquette a pour objet principal lorsqu'on découvre la voie pour relever les traverses, d'empêcher les matériaux, sable et pierres, entrant dans le ballast de couler sur les talus, où ils se perdent et nuisent à la végétation.

Ces petites banquettes ont 0,50 de largeur, quand le ballast est en sable, et de 0,75 à 0,85 quand le ballast est en pierre cassées. Dans ce dernier cas les talus des ballast sont remplacés par des petits murs en pierres sèches.

Ces banquettes produisent aussi une économie sur le prix du ballast en diminuant la quantité des matériaux à employer dans son établissement, ils favorisent le prompt écoulement des eaux et par suite l'assainissement de la voie.

Cas du déblai (fig. 13). Le dessus du sol est réglé comme pour le profil en remblai, en dos d'âne, c'est-à-dire qu'au milieu de la route le sol est à 0,45 au-dessous du niveau du rail et au bord de la voie à $0^{m}55$. De chaque côté de la voie se trouvent des fossés, ayant 0,75 de profondeur. Ces fossés sont nécessaires pour l'assainissement.

De petites banquettes de 0,90 de largeur destinés à la circulation des cantonniers et à recevoir les petits éboulements des talus du déblai se trouvent placés entre les fossés et les pieds des talus.

Les talus sont dressés à un de base pour un de hauteur. Pour le ballast en sable les talus ne tiennent guère sous l'inclinaison de un de base pour un de hauteur ; ils s'adoucissent et réduisent un peu la largeur des accotements.

Les petits murs en pierres sèches qui maintiennent le ballast permettent d'élargir soit l'axe, soit le fond du fossé, ou d'adoucir les talus extérieurs. Il est indispensable de prendre des précautions pour ne pas dégrader la surface supérieure du terrain, préparée et dressée en dos d'âne comme il est dit plus haut, lorsqu'on place le sable sur la voie. Dans la tranchée où il se trouve des rochers ou de grosses pierres il faut éviter de les laisser en évidence ; il faut même avoir le soin de les retirer jusqu'à une profondeur de 0^{m} 80 au-dessous du niveau des rails, afin d'éviter tout porte à faux des traverses.

Tels sont les profils généraux des déblais et remblais. Mais il y a des cas où il est nécessaire de les modifier.

Ainsi, dans le cas du remblai, on donne quelquefois au talus $1\ ^{3}/_{4}$ de base pour 1 de hauteur et on va même jusqu'à 2 de base, lorsqu'on a des terres très fluentes ou bien lorsqu'on a de la terre en excès.

Les machines en passant sur les grands remblais leur impriment quelquefois un grand mouvement de trépidation qui tend à produire des affaissements par suite des déformations qui, quelquefois, vont jusqu'à l'éboulement des terres. Ces éboulements sont surtout à craindre quand les remblais sont en glaise. Il faut donc évier autant que possible les remblais en glaise pure ; on doit mélanger la glaise de terre ordinaire ou d'autre matière, afin d'éviter les surfaces de glissement qui s'établissent dans les remblais de glaise et peuvent amener des éboulements très graves.

Il est très convenable de mettre une petite banquette au pieds des remblais, lorsqu'on craint les éboulements ; c'est presque toujours du pied que partent ces talus quand un éboulement se fait ; et une banquette consolide bien le talus.

Lorsque le pieds du remblais peut être battu par l'eau lors des crues d'une rivière par exemple, cette banquette sert de défense au talus et doit se placer un peu au-dessus du niveau présumé de l'eau dans la crue. Le chemin de fer de Corbeil présente, à l'entrée de la vallée d'orge et entre Paris et Corbeil, des applications de ce qui précède.

Dans le cas du déblai, on donne quelquefois au talus, mais le plus rarement possible $1\ ^{1}/_{2}$ de base pour 1 de hauteur. Quelquefois même, dans les terrains très mauvais, on va jusqu'à 2 de base pour 1 de hauteur. C'est à l'ingénieur qu'il appartient de statuer sur ces cas exceptionnels.

Quand les tranchées reçoivent à leur partie inférieure une grande masse d'eau, il convient de donner un mètre de profondeur au-dessous du rail, au lieu de 0^m 75, à chacun des fossés latéraux destinés à l'assainissement de la voie. Dans ce cas, pour ne pas trop élargir le fond de la tranchée, ce qui peut donner lieu à des terrassements très considérables et très coûteux, lorsque la tranchée est profonde, on doit faire le long des fossés des murs en pierres sèches ; ou, si on est forcé pour plus de solidité de faire des murs en maçonnerie, il faut avoir soin de percer cette maçonnerie de nombreuses barbacanes.

Quand le sol est mauvais, soit en déblai soit en remblai, c'est-à-dire lorsqu'il est de nature à s'amollir facilement par la présence des eaux, il est bon d'augmenter l'épaisseur de la couche de ballast de 0^m10 à 0^m15 sur laquelle reposent les traverses.

Lorsque le ballast est en sable un peu terreux ou un peu gras, impropre à laisser filtrer l'eau et à se sécher naturellement, on établit dans l'intérieur du ballast des pierres qui ont pour effet de faciliter l'écoulement des eaux et de la circulation de l'air, et par suite de sécher le sable.

Des moyens de consolider les talus.

Les moyens de consolider les talus sont :

1° De les adoucir, comme on l'a déjà dit. Ce procédé a été indispensable dans le cas de glaises qui s'éboulaient par le glissement et dans le cas de sable de grès très fins, sur lesquels le vent agissait de manière très pernicieuse.

2° De les recouvrir de terre végétale sur une épaisseur de 0^m08 à 0,10 afin de favoriser la végétation. Ce moyen a été employé avec succès dans les sables fins d'Étampes.

3° De les gazonner ou de les planter.

4° De les revêtir de percés en pierre sèches, lorsque l'eau vient en battre le pied ; il est quelquefois utile, dans ce cas, de soutenir le pied des percés par des pieux.

5° Quelquefois il est indispensable d'employer de petits murs, contrebutés contre les murs qui contiennent le ballast par de petites voûtes ; c'est ce qui arrive fréquemment pour le cas des glaises fluentes.

6° Les sables fins et mouillés filtrent quelquefois au travers des joints des percés dont on les recouvre. Dans ce cas il peut devenir nécessaire de soutenir les talus par de petits pieux et de petites palplanches.

Il ne saurait y avoir de règles fixes à établir pour l'emploi de chacun de ces systèmes, c'est à l'expérience de l'ingénieur de prononcer dans chaque cas particulier, le but que l'on doit toujours avoir en vue est d'assurer l'écoulement des eaux extérieures de manière à garantir complètement la voie.

Il est quelquefois indispensable de pilonner les terres et on ne saurait apporter trop de soins dans cette opération pour éviter les terrassements inégaux. Notamment dans les lacunes remplies après coup ; comme les rampes, les saignées destinées à l'écoulement des eaux, etc. ; aux abords des ouvrages d'art ; derrière les culées des ponts et dans l'intérieur des murs en retour.

Les tassements qui se produisent à l'époque où le chemin est en circulation, il faut sans cesse recharger la voie afin de combler avec du sable, les dépressions qui surviennent. Ce sable devant être apporté par les wagons qu'on met en circulation la nuit, pour ne pas gêner l'exploitation, augmente considérablement les dépenses.

Lorsque les travaux de remblai s'exécutent par wagon les tassements sont souvent très forts on a eu des exemples de terrassements qui ont été de un mètre et $1^{m}50$ après l'exécution de la voie. Ces tassements énormes augmentent beaucoup les dépenses d'entretien par suite de la difficulté des transports de sable.

Lorsque les remblais peuvent s'exécuter par couche de $0^{m}50$ ou $0^{m}60$, et quand en même temps les transports se font au moyen de tombereaux, le passage des véhicules brisent les mottes de terre et exerce une sorte de pilonnage très propice au terrassement immédiat des terres.

Des moyens de transport pour effectuer les terrassements.

Brouettes. Ce mode de transport convient pour une distance moindre que 90 à 100 mètres. Lorsque les distances dépassent cette limite, on est forcé d'avoir recours soit aux wagons, soit aux tombereaux. Nous ne donnerons pas les formules qui servent à calculer les prix des transports. Les formules pour le cas des wagons n'ont pas été appliquées par nous sur une assez grande échelle pour que nous les donnions comme base des calculs que l'on doit effectuer.

Les avantages des transports par tombereaux sont :

1° d'opérer les transports avec un matériel que l'on rencontre partout, dont on se débarrasse aisément, le travail une fois fini, et qui permet de donner une extension très grande au travail sans trop de frais et de difficulté.

2° de bien broyer les terres, de les faire tasser promptement et uniformément, de faire en un mot de très bons remblais.

Les avantages des transports par wagons sont :

1° d'être beaucoup plus économique, pour ce qui concerne le transport proprement dit : un cheval d'une force ordinaire peut traîner dans un wagon de chemin de fer de 2 mètres cubes à $2^{m}50$ de terre ; dans un tombereau et sur un terrain ordinaire, il ne traînera que $0^{m}40$ ou $0^{m}50$ de terre. La différence varie d'autant plus que la voie est mieux dressée ; mais la charge et la décharge des wagons, présentent souvent des jets de pelle et même des transports à la brouette ; des changements de place des rails, etc., enfin un matériel considérable et coûteux, en wagons, chemin de fer, etc., dont il est très difficile de se défaire après l'achèvement des travaux. Toutes ces raisons font que pour de petites distances, le tombereau peut soutenir avec avantage la comparaison avec le wagon.

Quelle est la distance pour laquelle il convient d'abandonner le tombereau pour le wagon ? C'est ce que nous ne saurions dire au juste. Cette distance varie évidemment avec la disposition des remblais et des déblais, disposition qui favorise plus ou moins les chargements et déchargements.

2° De pouvoir se faire dans des terrains de mauvaise qualité, par tous les temps possibles tandis que les transports en tombereau sont, sinon impraticable du moins très dispendieux lorsque le terrain est gras et le temps pluvieux.

C'est encore une de ces questions délicates dont l'appréciation et la solution sont laissées à l'expérience et à la sagacité de l'ingénieur.

7e Leçon

Des travaux d'art.

Considérations générales sur les travaux d'art

Ils sont, pour les chemins de fer, semblables à ceux qui s'exécutent ordinairement pour les routes et pour les canaux ; seulement il importe dans les chemins de fer, plus encore que dans les canaux et les routes ordinaires, d'avoir des maçonneries bien faites et dans lesquelles n'entrent que des matériaux de bonne qualité ; les raisons en sont :

1° — que les travaux d'art sur les chemins de fer supportent, lors du passage des locomotives, des poids accidentels plus forts que sur les routes ordinaires et dans les canaux ;

2° — que les inégalités ou les irrégularités dans la pose, les joints des rails qui ne se raccordent jamais d'une manière parfaite, donnent lieu à des mouvements de trépidation qui sont de nature à disjoindre et à altérer des maçonneries mal faites ;

3° — Enfin, que l'entretien et les réparations des travaux d'art sont plus difficiles et plus dispendieuses sur un chemin de fer que sur toute autre voie de communication.

Ainsi, chaux hydraulique de bonne qualité et bousable pour les mortiers, addition de pouzzolane quand la chaux est douteuse.

Moellon dur, résistant et surtout non gelit dans les maçonneries, et principalement dans les parements, sur une épaisseur de 0^m40 à 0^m50 au moins.

Pierres de taille dans les têtes et les couronnements.

Avoir égard, dans les épaisseurs des voûtes et des murs en retour aux hauteurs extraordinaires, et aux charges qui en résultent, des terres que les voûtes doivent porter et que les murs doivent soutenir.

Donner, en général, au parements droits un fruit de $^1/_{15e}$ à $^1/_{20e}$; éviter les murs d'à plomb, qui ont toujours l'air de surplomber et qui, au moindre mouvement surplombent en effet.

Sur les voûtes, se réserver, pour la couche de sable au-dessus de l'extrados de la voûte et de sa chape, une auteur de 1^m au moins jusqu'à la surface du rail, afin qu'il y ait, entre le dessous de la traverse et la maçonnerie une épaisseur de sable de 0^m50 à 0^m60 au moins, formant une espèce de matelas destiné à amortir les coups et les vibrations que le passage de la motrice peut donner aux maçonneries.

Quand une voûte est sous un remblai un peu élevé, adopter aux deux têtes des murs en ailes de préférence aux murs en retour ; les murs en retour sont souvent poussés et s'écartent l'un de l'autre, en provoquant des disjonctions dans le corps de la voûte ; les murs en aile, au contraire, poussent des espèces de contreforts qui contrebutent les deux têtes de la voûte et s'opposent aux disjonctions que les vibrations tendent à produire.

Quand on a, dans les grands viaducs, des piédroits ou des piles d'une grande hauteur, les couper, de distance en distance, par des assises horizontales en pierre de taille, formant autant de voûtes superposées, portant le corps de la pile proprement dite.

Les chapes de $0^{m}50$ à $0^{m}60$ d'épaisseur, doivent être faites en mortier de première qualité, lissées avec soin, de manière à n'avoir ni gerçures ni crevasses ; donner à ces chapes de fortes inclinaisons ; mettre à leur surface quelques pierres brutes pour faciliter le passage et l'écoulement des eaux.

Nécessité pour marcher vite, d'adopter des types de travaux pour tous les cas ordinaires et ne faire des projets spéciaux que pour les cas exceptionnels ou extraordinaires.

Diviser les travaux d'art en deux catégories :

1° Travaux extraordinaires, c'est-à-dire offrant des dimensions exceptionnelles et exigeant des projets spéciaux.

2° Travaux ordinaires, c'est-à-dire exécutés suivant des types généraux que l'on modifie légèrement lorsque les circonstances l'exigent.

I. Des travaux extraordinaires

Des viaducs élevés : Dispositions des culées ; murs en retour minces de $1^{m}20$ à $1^{m}50$ d'épaisseur, portant des voûtes en ogives, entre lesquels murs le talus de remblai se produit naturellement comme à l'extérieur, de manière à éviter à peu près toute poussée sur les murs en retour ; à la naissance des voûtes en ogives une bonne précaution que nous avons prise, a été, pour plus de sûreté, de relier ces murs en retour par des boutons en fer forgé, avec de grandes plaques de fonte aux extrémités, formant écrous.

On aurait, sur les murs en retour, des poussées énormes si l'on remplissait l'intervalle qui les sépare de remblais comme dans les constructions ordinaires.

Même pour les viaducs ou ponts de peu de hauteur, il importe de veiller, avec le plus grand soin à la nature des terres que l'on mets entre les murs en retour derrière les culées ; il est des terres de nature glaiseuses qui se gonflent par l'humidité et donnent lieu à des poussées auxquelles rien ne résiste ; mettre, autant que possible dans ces points là, des terres perméables autant que possible, terres sablonneuses, pierres sèches de mauvaise qualité quand on en a.

Pour les souterrains il n'en existe pas sur le chemin d'Orléans ; ce serait sortir de mon sujet en en parlant, n'ayant en vue, ici, que la description des travaux du chemin d'Orléans.

Pour ponts à grandes arches, je n'en ai pas fait non-plus ; les éviter quand on peut ; les grandes arches ne sont guère indispensables que sur les rivières navigables ; les viaducs dans les vallées se font de préférence avec des arches de 8 à 10^{m} d'ouverture seulement ; ces arches sont en général,

d'une construction plus facile et plus économique, d'une solidité plus assurée, surtout en petits matériaux, c'est-à-dire en moellons, d'un entretien enfin moins dispendieux.

II. Des travaux ordinaires.

Les travaux ordinaires peuvent se diviser en trois classes :

1° – Passage à niveau ;

2° – Ponts et aqueducs par dessous le chemin de fer, soit pour l'écoulement des eaux, soit pour le passage du public ;

3° – Passage par dessus le chemin de fer pour la circulation publique (Il peut aussi arriver que l'on ait à faire passer un cours d'eau par dessus le chemin de fer ; mais ce cas doit être très rare, si jamais il se présente, attendu que les cours d'eau sont toujours dans des bas fonds et que dans ces mêmes bas fonds les chemins de fer sont ordinairement en remblais).

I. Des passages à niveau

Des contre-rails pour maintenir les pavés et les empierrements et assurer ainsi un libre passage aux rebords des roues tant des locomotives que des voitures.

Dispositions adoptées sur la ligne de Corbeil ; sabots placés sur les traverses comme des sabots ordinaires ; inconvénient que cette disposition présente pour les pavés qui à l'aplomb des travaux n'ont pas une épaisseur suffisante.

Dispositions adoptées sur la ligne d'Orléans pour remédier à ces inconvénients (voir le dessin ci-joint). (fig.)

Préférer dans les passages, à niveau les pavés aux empierrements à cause des petites pierres qui dans ces derniers systèmes peuvent facilement être jetées soit par les roues des voitures, soit par les pieds des chevaux, dans le jour laissé entre le rail et le contre-rail pour le passage des rebords des roues de wagons.

De la largeur des passages :

Pour les routes royales . . . . . 8^{m},00

Pour les routes départementales 7,00

Pour tous les chemins, de grande communication, vicinaux ordinaire, de desserte, particulière 5,00

Pour les sentiers de piétons 2,00

Disposition générale des barrières, largeur de 5,00, n'ayant qu'un seul ventail et ne pouvant fermer que le chemin ordinaire, que le passage soit droit ou biais.

A) Disposition exceptionnelle des barrières : Barrière à deux vantaux pouvant se fermer à volonté, soit sur le chemin de fer, soit sur le chemin ordinaire, et laissant toujours ouverte une largeur de $7^{m}40^{(*)}$ pour le passage du chemin de fer.

Le grand avantage de ces barrières sur les passages que traversent souvent des troupeaux de bestiaux.

Éviter, autant que possible, les passages à niveau pour les routes royales et départementales et pour les chemins vicinaux importants, ne pas oublier qu'un gardien payé 800 à 900^{fr} par an, représente un capital de 15 à 18.000^{fr} ; qu'une maison de gardien coûte toujours de 2 à 4000^{fr} ; que les barrières, les pavages, les contre-rails, etc., représentent une dépense de 2 à 3.000^{fr} et qu'en définitive un passage à niveau équivaut à une dépense en capital de 20 à 25.000^{fr}, que ces passages offrent en outre, des chances d'accident plus ou moins grandes et qu'en définitive un pont par dessus ou par dessous peut souvent être une économie réelle.

II. Des ponts et aqueducs par dessous le chemin de fer.

Ces ponts et aqueducs peuvent servir à deux usages : à l'écoulement des eaux, soit continues, soit accidentelles, au passage d'une voie de circulation, publique ou particulière ; très souvent ils servent à la fois et en même temps aux deux usages.

Des aqueducs ou passages par dessous destinés spécialement à l'écoulement des eaux.

1° Tuyaux en fonte, de $0^{m}40$; $0^{m}30$; $0^{m}20$; $0^{m}10$ de diamètre, s'appliquent à de petits cours d'eau, non susceptibles de fortes crues, ou de petits ruisseaux alimentant des bassins dans des jardins particuliers.

Il importe de ne pas les placer trop près du rail, afin que le passage des machines ne puisse les faire casser ; d'un autre côté, il ne faut pas les descendre trop profondément en terre, pour qu'on puisse, en cas de rupture, d'accident ou de réparation quelconque, les changer ou les réparer dans une nuit, entre le dernier convoi du soir et le premier convoi du matin ; nous les plaçons au moins à 1^{m} au-dessous du rail, et, au plus, à $2^{m.}$ Quand la hauteur, entre le fond du ruisseau et le niveau du rail est de plus de $2^{m,}$ un aqueduc voûté en maçonnerie est préférable à un tuyau en fonte.

Quand un tuyau passe sous le chemin de fer en siphonnant fortement, comme sont les jardins de luxe, les tuyaux qui alimentent, soit des réservoirs élevés, soit des jets d'eau, il est prudent de mettre, sous le chemin de fer, un double tuyau ; un tuyau en plomb, du diamètre voulu par la conduite, et un tuyau enveloppe en fonte ; si le tuyau extérieur vient à crever par une cause quelconque, les eaux peuvent s'échapper sans venir jaillir, sous forme de jets d'eau, à la surface de la voie, où elles pourraient détremper le sol, l'amollir et donner lieu à quelques accidents.

2° Des petits aqueducs de $0^{m}70$ d'ouverture, avec la hauteur que l'on veut, variable entre $0^{m}50$ et 1^{m} à $1^{m}50$ au-dessous du rail.

(*) c'est-à-dire $3^{m}70$ entre l'axe du chemin de fer et la face intérieure de chaque poteau fixe, ce qui donne entre les faces des deux poteaux opposés et correspondants, une largeur de $7^{m}20$ pour les passages droits, mais qui peut devenir bien plus grand pour les passages biais.

Les culées de ces aqueducs sont en maçonnerie ; les rails forment pour ainsi dire pont ; les coussinets étant placés sur les faces des deux culées et le rail n'ayant aucun point d'appui entre ces deux culées.

Le petit plancher en bois qui couvre l'intervalle compris entre les deux culées, ayant pour unique objet de porter une petite couche de sable, afin de continuer la voie et de ne pas y laisser une lacune pour les cantonniers ou autre personne qui la suive à pied.

Ces petits aqueducs s'emploient à peu près dans les mêmes circonstances que les tuyaux en fonte.

Pour les ouvrir ou les nettoyer, on relève le plancher en bois qui recouvre l'intervalle entre ces deux culées.

3° Des aqueducs en maçonnerie.

Il importe que ces aqueducs ne soient pas trop petits, afin qu'un homme puisse toujours, en cas de besoin, les visiter et s'assurer qu'ils ne peuvent donner aucune inquiétude.

Nos plus petits aqueducs en maçonnerie ont 1^m de largeur et 1^m à 1^m50 de hauteur sous clef, ce qui représente, entre la surface du radier et le niveau du rail, une distance de 2^m20 à 2^m70 ; l'épaisseur de la voûte à la clef, et la couche de sable qui la recouvre, formant ensemble une hauteur de 1^m20, en les supposant, toutes deux, réduites à leur minimum ; quand la hauteur est plus grande, l'aqueduc en maçonnerie se construit sans difficulté avec les dimensions en largeur et hauteur nécessaire au passage des eaux.

4° Des aqueducs avec culée en maçonnerie et poutre en fonte.

Lorsque l'aqueduc doit avoir de la largeur et qu'on ne dispose pas en même temps d'une hauteur suffisante pour faire une ou plusieurs voûtes en maçonnerie, on emploie des poutres en fonte, s'appuyant par leurs extrémités sur les piles et les culées et portant les rails, les intervalles entre les poutres étant recouverts par un tablier en bois ; nous reviendrons tout à l'heure sur ces poutres en parlant des ponts par dessous le chemin de fer, destinés à la descente d'une voie publique ou particulière.

Des ponts ou passages par dessous le chemin de fer destinés à la desserte des voies de communication.

Les dimensions fixées par le cahier des charges pour ces ponts ou passages sont :

En largeur au moins
- pour une route royale . . . . . 8^m
- pour une route départementale . . . . . 7^m
- pour un chemin vicinal de grande communication . . 5^m
- pour un chemin vicinal ordinaire . . . . . 4^m

La hauteur à partir de la chaussée de la route est, pour tous ces ponts, de 5^{m} au moins sous clef quand ils sont voûtés en maçonnerie, de 4^{m}30 au moins sous poutre quand ils sont formés d'un tablier porté par des poutres en fonte ou en bois .(*)

La largeur de passage du chemin de fer sur ces ponts, doit être entre les parapets, de 7^{m}40 au moins.

La hauteur des parapets doit être de 0^{m}80 au moins.

Cette largeur de passage pour le chemin de fer et cette hauteur des parapets sont et doivent rester les mêmes, bien entendu, pour des ponts par dessous qui au lieu d'être destinés à la traversée d'un chemin le seraient à la traversé d'un cours d'eau.

Faire les ponts par dessous en maçonnerie quand on le peut, mais remarquer qu'il faut une hauteur de remblai de près de 7^{m} pour établir un pareil pont sans difficulté ; en effet :

La hauteur sous clef doit être de au moins . . . . . 5^{m}

L'épaisseur de la voûte à la clef, la chape, le matelas du sable interposé entre le dessus de la maçonnerie et le dessous des traverses occuperont, environ, une hauteur de . . . . . 2^{m}00

Total pareil . . . . . 7^{m}00

Pour augmenter la hauteur dont on peu disposer, on creuse quelquefois la route ordinaire sous le chemin de fer, en raccordant le nouveau sol avec l'ancien aux abords du pont au moyen de rampes plus ou moins fortes.

Quand on adopte cette disposition, il faut veiller à maintenir l'écoulement pour les eaux et ne pas faire, aux abords du pont, des rampes trop fortes.

Les règles adoptées à cet égard là sont de ne pas admettre sur les nouvelles routes, des pentes ou rampes d'une déclivité excédant 0^{m},03 pour les routes royales et départementales, et 0^{m},05 pour les chemins vicinaux.

Sur les chemins dont les pentes avant l'exécution sont plus fortes que les pentes indiquées ci-dessus, l'administration a admis une dérogation à la règle qu'elle avait posée et elle reconnaît en général, aux compagnies le droit de conserver, sur les nouvelles routes, les pentes existant sur les anciennes, soit au point même où la déviation a lieu, soit aux abords.

Ces règles, relatives aux pentes, sont applicables à tous les cas où des routes se trouvent déviées par suite de la construction du chemin de fer.

Quand la hauteur du remblais est de plus de 7^{m}, il y a toujours lieu à faire des ponts en maçonnerie.

On conçoit que la hauteur sous clef peut être alors, sans inconvénient supérieure à 5^{m} et s'élever à 6, 7, 8, 9 mètres ou plus ; nous avons des viaducs qui ont jusqu'à 10 et 16^{m} de hauteur sous clef.

(*) Je crois que cette hauteur sous poutre de 4^{m}30, un peu faible pour des voitures chargées de paille et de foin, il conviendrait, pour satisfaire largement à tous les besoins, de la porter à 4^{m}50

Les dimensions en hauteur et en largeur, pour les passagers peuvent ensuite varier beaucoup et être réduites dans certains cas particuliers, lorsque les chemins ne sont que de desserte ou d'une faible importance, au moyen d'arrangement amiables avec les communes ou les particuliers.

L'ingénieur est, comme on sent, libre, quand la hauteur du remblais est ainsi supérieure à 7^m, de choisir la hauteur sous clef qu'il lui convient d'adopter, sauf à faire varier, en conséquence, la longueur de la voûte.

Pour les grands viaducs à plusieurs arches, il y a en général avantage à porter la hauteur sous clef à son maximum.

Pour les ponts en aqueducs d'une seule arche et d'une petite ouverture, il y a avantage, au contraire, à faire la voûte aussi basse sous clef et par suite, aussi longue que possible, avec des murs en aile.

Des ponts biais. Moyen de les éviter qu'il est bon d'employer quand on n'a à sa disposition que de petits matériaux ; on fait des ponts droits un peu allongés.

Des ponts avec poutres en fonte et tablier en bois.

Nous avons fait, sur la ligne de Corbeil, des ponts avec poutres et tablier en bois ; mais je crois que les poutres en bois, que je n'avais adopté que par des motifs d'économie, sont mauvaises et qu'il faut leur préférer des poutres en fonte, vu la difficulté de les renouveler.

Quant au tablier en bois, il peut s'entretenir et se renouveler sans arrêter la circulation ; il ne me paraît présenter aucun inconvénient.

Nos poutres en fonte sont de deux espèces ; celles qui portent le plancher par dessus la poutre et celles qui le portent au moyen de rebords inférieurs (voir les dessins de ces deux systèmes) (fig. 14).

L'épaisseur, entre le dessous de la poutre et le dessus du rail est dans le 1er système de 0,68

Savoir : hauteur de la poutre . . . . . 0^m,45 (variable avec la portée)
Épaisseur du plancher 0,08
Épaisseur de la semelle du sabot 0,04
Hauteur du rail 0,11
Total pareil . . . . . 0^m,68

Et dans le second système, de . . . . . 0^m.34

Savoir : Épaisseur inférieure des poutres jumelles . . . . . 0^m.04
Épaisseur de la semelle en bois destinée à porter les coussinets et à former une espèce de matelas sur la fonte 0,15
Épaisseur de la semelle du sabot 0,04
Hauteur du rail 0,11
Total pareil . . . . . 0^m,34

Les rebords inférieurs ont, comme on voit, pour but de réduire autant que possible l'épaisseur du système portant, et d'augmenter ainsi la hauteur dont on peut disposer pour le passage.

Il s'agit seulement de donner aux fontes des dimensions suffisantes ; c'est ce que nous avons fait, comme on peut s'en assurer par le calcul.

Les poutres sont calées par un lit de ciment de Pouilly, portant sur la pierre de taille.

Avantage de ces poutres pour les ponts biais.

Nous avons employé des poutres ayant une portée de 6^m

de 5

de 4

de 3

de 2

III. Des ponts par dessus le chemin de fer

La largeur des ces ponts, entre les parapets, est, comme pour les ponts par dessous,

Pour une route Royale de . . . . . 8^m.
Pour une route départementale . . . . . 7.
Pour un chemin vicinal de grande communication . . . . . 5.
Pour un chemin vicinal ordinaire . . . . . 4.

La largeur de passage du chemin de fer, entre les deux culées, est de 7^m40.

La hauteur verticale entre le dessus des rails et le dessous du pont, soit la maçonnerie, soit en charpente, doit être 4.30

Nous avons adopté, sur le chemin d'Orléans 4.80,

hauteur nécessaire pour qu'une grosse diligence, avec son cabriolet découvert, montée sur un trock ordinaire, puisse passer sous les ponts.

Quand on a de la hauteur, on peut faire ces ponts en maçonnerie ; mais, en général, il vaut mieux les faire en charpente, de manière à ne pas cacher la vue.

(Voir le type de nos ponts pour la ligne d'Orléans) (fig. 15)

L'inconvénient que l'on peut reprocher à ce type et auquel il faudrait remédier est dans l'emploi des portées en bois ; il faudrait, de préférence, adopter des portées en fonte, de manière à n'avoir à entretenir et à renouveler que des poutres et un plancher qui peuvent s'enlever et se replacer sans gêner le moins du monde la circulation sur le chemin de fer.

L'enlèvement et la repose des palées est de nature, au contraire, à donner lieu à quelques embarras.

Ce type s'applique à des ponts biais comme à des ponts droits, en ayant soin, pour les ponts biais, lorsque l'ouverture et par suite les portées des poutres augmentent sensiblement, de substituer des poutres plus fortes ou des poutres jumelles aux poutres simples qui figurent dans notre dessin.

Les ponts à construire à la rencontre des routes Royales et départementales doivent être en maçonnerie ou en fer.

Différence essentielle entre les ponts par dessus et les ponts par dessous, en ce que les premiers peuvent être entretenus et renouvelés sans gêner la circulation, tandis qu'il n'en est pas de même pour les seconds ; de là vient que nous avons employé, pour les poutres, de la fonte dans les ponts par dessous et du bois dans les ponts par dessus.

D'un pont à Étampes sous lequel passent 3 voies et dont la travée du milieu a 12^{m} d'ouverture. Système de suspension sous les poutres ; câbles en fil de fer attaché aux deux extrémités de la poutre, les tensions de la chaîne étant maintenues en équilibre par la poutre, le système n'exerce aucun effort de traction sur les piles.

Passerelle pour piétons, de 2^{m} de largeur, ayant également 12^{m} d'ouverture ; poutres armées formant garde corps.

8e Leçon.

La première question à résoudre, pour l'établissement d'un chemin de fer, est l'exacte détermination de son axe.

Tant de considérations doivent influer sur cette détermination qu'il est difficile de les énumérer ici ; il y a toujours un juste milieu à rechercher entre la perfection dans le tracé, qui est en général la ligne droite, en plan, et le palier en profil, et les dépenses qu'exige cette perfection.

On adopte des courbes en plan et des rampes et des pentes en profil pour éviter des travaux quelquefois impraticables, le plus souvent seulement très coûteux ; mais il faut ne recourir à ces courbes et à ces pentes que le moins possible.

Pour un chemin de voyageurs, où les convois marchant dans un sens sont généralement équivalents aux convois allant en sens contraire, un tracé de niveau, ou s'en approchant le plus possible, est ce qu'il y a de mieux.

Pour un chemin de marchandises, au contraire, il peut arriver que les transports soient beaucoup plus considérables dans un sens que dans un autre, tel est le chemin de St Étienne à Lyon, dont le but principal a été le transport des charbons du bassin de St Étienne au Rhône ; pour un pareil chemin, il est évident qu'une pente plus ou moins forte, dans le sens du plus grand mouvement, est préférable à un palier.

Comme presque tous les chemins servent à la fois aux voyageurs et aux marchandises, l'ingénieur a à prendre en considération, dans le choix de son tracé, tous les éléments probables de transport qu'il peut prévoir et il arrête ensuite ses idées en conséquence.

Presque toujours, les difficultés de terrains ne laissent pas à ce choix toute la latitude désirable et imposent à l'ingénieur le tracé qu'il doit suivre.

En traitant la question des locomotives, nous avons parlé des pentes et des rampes, des déclivités qu'il convient d'adopter dans des circonstances données et de l'influence que ces pentes et rampes exercent sur la traction ; nous ne reviendrons pas sur ce sujet.

Nous ferons remarquer seulement que quelques fois, pour faciliter la constitution d'un travail d'art, on se permet de rompre l'uniformité du profil en rampe, pente ou palier et que l'on introduit

aux abords de ce pont, une rampe et une contre-rampe de quelques centaines de mètres ayant une déclivité plus forte que la rampe normale de la portion de chemin ou l'on se trouve.

Une machine, en vertu de la vitesse acquise, franchit sans difficulté une pareille inégalité qui souvent facilite beaucoup la construction d'un travail d'art ; nous n'avons pas eu occasion de faire usage de cette facilité sur la ligne d'Orléans, mais nous savons qu'elle a été admise sur plusieurs chemins anglais et nous l'indiquons parce qu'elle ne nous paraît présenter aucun inconvénient grave ; il faut cependant n'y recourir que quand il y a nécessité réelle.

Pour les courbes, le minimum de rayon qui nous était imposé était de 800^{m} ; nous avons adopté 1.000^{m} ; dans les gares et stations pour les voies de service on peut (et l'on y est souvent obligé) adopter des rayons plus faibles ; nous avons quelquefois admis des rayons de 500 et même de 250 mètres ; mais nous l'avons fait le moins souvent possible.

Lorsqu'on a une courbe de 2,000 à 2,500^{m} de rayon, il est inutile de chercher mieux ; il ne faut donc recourir aux courbes d'un rayon plus grand que lorsque le terrain le demande et qu'une courbe à très grand rayon est de nature à placer le tracé sur un terrain parfaitement disposé, ce qui arrive quelquefois.

Les courbes se tracent par abscisses et ordonnées ; c'est à l'ingénieur à choisir des axes de manière à simplifier autant que possible le tracé et eu égard aux difficultés du terrain ; on conçoit avec quelle exactitude doivent être relevées les bases d'opérations d'après lesquelles le tracé s'établit.

Quand l'axe est bien déterminé sur le terrain ; quand le profil en long a été relevé avec soin, il faut fixer sur chaque point la largeur du terrain à acquérir pour l'établissement du chemin proprement dit et de ses dépendances.

Je m'expliquerai sur ce que j'entends par ses dépendances ; ce sont :

1° Les gares d'évitement et de stationnement pour le remisage des locomotives et des wagons, pour l'embarquement et le débarquement des voyageurs, pour le chargement et le déchargement des marchandises et des bestiaux ; enfin, pour tous les besoins du service de l'exploitation, que l'ingénieur doit chercher à prévoir de son mieux.

2° Les fossés nécessaires pour rétablir le cours des eaux là où il est modifié par suite de la construction du chemin de fer ; il arrive souvent que pour ne pas trop multiplier les aqueducs on réunit en un seul par des fossés latéraux au chemin de fer plusieurs petits cours d'eau ; il faut, pour le creusement de ces fossés latéraux, acheter des terrains quelquefois aussi, ou détourner un cours d'eau pour choisir un point convenable pour la fondation d'un aqueduc (exemple : la Louette et la Chalouette à Étampes, où l'on a rejeté ces deux petites rivières au pieds des coteaux qui bordent la vallée, au lieu de les laisser au milieu de cette vallée où elles se trouvaient primitivement ; on a pu ainsi fonder les deux viaducs de la Louette et de la Chalouette sur un terrain solide, tandis qu'on ne trouvait au milieu de la vallée qu'un terrain incapable de résistance avec une épaisseur de plus de 20 mètres ; il y a lieu encore, en pareil cas d'acheter les terrains nécessaires à l'ouverture de nouveaux lits).

3° Les déviations de chemins, pour faciliter la construction d'un travail d'art ; les chemins latéraux de 3. 4. 5 et quelquefois 8^m de largeur, souvent indispensables pour la desserte des propriétés coupées par le chemin de fer, et très utiles pour réduire le nombre des passages à établir sur ou sous le chemin ; il faut, dans les commissions d'enquête, souvent offrir de pareils chemins pour obtenir des suppressions de passages ; on y trouve une grande économie.

4° Les dépôts et les emprunts de terres, quand on peut les prévoir d'avance, il est bon de les comprendre dans les plans parcellaires, surtout pour les terrains clos, pour lesquels de pareils travaux ne sont imposables aux propriétaires que moyennant expropriation.

Pour le chemin il faut acheter la largeur du chemin proprement dit qui est de 8^m30 au remblai et de 12^m au déblai, avec les petits fossés latéraux, leurs talus et leurs banquettes.

Plus l'emplacement des talus ; pour parer à toute chance d'éboulement, nous avons calculé

1° les talus en remblai à 2 de base pour 1 de hauteur, quoiqu'en exécution nous n'ayons donné à ces mêmes talus que $1\ ^1/_2$ de base pour 1 de hauteur ;

2° les talus en déblai à $1\ ^1/_2$ de base pour 1 de hauteur, quoique en exécution nous ne leur ayons donné que 1 de base pour un de hauteur ; cet excédant de largeur de terrain a pour objet de permettre d'adoucir les talus quand le besoin s'en fait sentir, sans recourir à une nouvelle expropriation.

Plus encore, deux banquettes aux pieds des talus en remblais et au sommet des talus en déblais ; ces banquettes ont, pour les remblais 2^m de large, et, pour ces déblais, 3^m du côté de la vallée ; cet excès de largeur, du côté du coteau, a pour objet de permettre l'établissement, s'il est nécessaire, de fossés supérieurs pour recevoir les eaux et les empêcher de tomber dans la tranchée.

Ces banquettes servent à la plantation des haies de clôtures qui exigent 1^m00, pour un petit sentier de circulation, pour les personnes qui gardent et surveillent le chemin.

On voit que pour déterminer les largeurs des terrains à acquérir, il faut avoir des profils en travers ; si le terrain était de niveau ou à peu près, la largeur des terrain à acquérir serait représentée :

<u>en remblai</u>, en appelant h la hauteur du chemin sur le point que l'on considère par la formule

$$8\ m\ ,30 + 4\ h + 4\ m\ ,00 = 12\ m\ ,30 + 4\ h\ .$$

dont moitié à gauche et moitié à droite de l'axe du chemin.

<u>en déblai</u>, en appelant h la profondeur de la tranchée au point que l'on considère par la formule

$$12\ m\ ,00 + 3\ h + 5\ m\ ,00 = 17\ m\ ,00 + 3\ h\ .$$

dont $8^m + \frac{3\ h}{2}$ du côté de l'axe où se trouve la vallée et $9^m + \frac{3\ h}{2}$ du côté de l'axe où se trouve le coteau.

Quand ce terrain au lieu d'être de niveau, ou à peu près, offre une pente transversale, il y a lieu de modifier les formules ci-dessus et de calculer la largeur du terrain à acquérir d'après la forme que présente le sol sur lequel doit reposer le chemin, en partant toujours des mêmes hypothèses en ce qui concerne les inclinaisons des talus et les largeurs des banquettes.

Dans des cas exceptionnels où l'on aurait des terrains précieux ou des constructions à acquérir, il faut réduire la largeur au strict nécessaire en raidissant les talus au moyen de pierres ou murs de soutènement, et en réduisant les banquettes.

Dans la traversée des parcs, ne le réduire que quand il y a évidemment économie ; car certains propriétaires trouvent tout le dommage dans la traversée ou la coupure du parc proprement dit et font à peu près abstraction de la surface.

Il faut en pareils cas sonder les dispositions des propriétaires et agir ensuite.

Quand on a ainsi exactement fixé les limites du terrain dont on a besoin, arrêté les chemins latéraux, les fossés latéraux, les déviations de routes et de ruisseaux, les emplacements nécessaires à la construction des travaux d'art et à l'établissement de leurs abords, les terrains devant servir à des emprunts ou à des dépôts, les superficies pour les gares de stationnement et d'évitement, il ne reste plus qu'à dresser les projets qui doivent être soumis soit à l'administration supérieure, soit aux enquêtes locales.

Je donnerai ici la liste des pièces qui doivent entrer dans un projet.

Il serait à désirer que les cadres de ces projets, les échelles des plans et des profils, les indications qu'ils doivent contenir fussent arrêtés d'avance, afin d'ôter à l'ingénieur toute incertitude et toute hésitation.

On indiquera ici comment les projets du chemin d'Orléans ont été dressés, sauf aux ingénieurs à les imiter ou à les corriger si bon leur semble.

On ne parlera pas ici des plans relatifs aux enquêtes ordonnées par l'art. 3 du titre *I* de la loi d'expropriation du 3 mai 1841 ; enquêtes qui ont pour objet d'obtenir l'avis des localités sur la direction générale du tracé.

On comprend que ces plans doivent varier avec l'étendue de la ligne qu'il s'agit de soumettre aux enquêtes ; ainsi pour soumettre aux enquêtes le tracé général d'un chemin de fer, de Paris à Lyon, par exemple, suivant soit la vallée de l'Yonne, soit la vallée de la Seine, soit enfin la vallée de l'Aube, il faut un plan à une très petite échelle, ressemblant plutôt à une carte qu'à un plan ; on a ensuite des plans de détail sur une échelle plus grande pour les parties présentant des difficultés réelles et pouvant devenir, lors des enquêtes, l'objet d'une discussion et d'un examen sérieux.

Pour notre chemin d'Orléans, les enquêtes ont eu lieu sur des plans dressés à l'échelle de $\frac{1}{10.000}$ ou $0^{m}.001$ pour 10 mètres.

Le dossier qu'on soumet à l'administration comprend, outre le plan en question, un profil en long sur lequel on adopte pour les distances horizontales, la même échelle que pour le plan, c'est-à-dire 1 à 10.000 et pour les hauteurs verticales, l'échelle de $\frac{1}{1.000}$ ou de $0^{m}001$ pour mètre.

Au plan topographique et au profit dont il vient d'être question, on joint une notice explicative qui est la pièce importante du projet et dans laquelle on expose les motifs qui ont déterminé les ingénieurs à l'adoption d'un tracé de préférence à tous autres.

On joint à ces projets des plans détaillés pour les parties exceptionnelles et importantes du projet, sur lesquelles on désire appeler l'attention des commissions d'enquête, soit pour faire admettre, soit pour faire repousser le projet.

Du plan topographique.

Lorsqu'un tracé général a été arrêté, il s'agit de procéder aux études de détail.

On soumet, à cet effet, des plans topographique à l'ad.^{on} représentant le tracé d'une manière plus précise, plus détaillée et plus complète que dans le premier projet ; il importe, autant que possible, que ce projet ne soit plus modifié, sauf quelques détails relatifs aux travaux intéressant les communes.

Le dossier des plans topographiques se compose

I. D'un plan à l'échelle de 1 à 5000 ou de 0,0002 par mètre indiquant

1° l'axe du chemin de fer, tracé avec toute l'exactitude possible ;

2° les rayons de toutes les courbes et le point de tangente avec les alignements droits ;

3° les largeurs approximatives des terrains à acquérir avec les emplacements des gares d'évitement et de stationnement ;

4° les passages pour la traversé du chemin de fer, soit par dessus, soit par dessous, soit à niveau ;

5° les ouvrages pour l'écoulement des eaux et enfin tous les travaux d'art que l'établissement du chemin pourra nécessiter ;

6° les emplacements des profils en traverse que l'on joint au projet pour donner une idée générale de la forme du terrain ;

7° les extrémités des pentes, paliers et rampes sont indiquées par les lettres *a b c* etc. servant à rattacher le plan avec le profil en long qui l'accompagne ;

8° les limites des communes, arrondissements et départements.

Ces plans topographiques comprennent une longueur de 15 à 20 000^{m} et embrassent la traversée du chemin de fer dans plusieurs communes, mais ils ne doivent s'appliquer qu'à un arrondissement, attendu qu'ils sont déposés dans les sous-préfectures de chaque arrondissement avec les plans d'enquête.

II. Une feuille de profils représentant le profil en long, à l'échelle de 1 à 5 000 pour les distances horizontales et de 0^{m}001 par mètre pour les hauteurs verticales ; sur le profil en long sont marqués par les lettres *a b c* etc.... les extrémités des pentes, paliers et rampes servant de point de raccordement du profil avec le plan.

Sur le profil en long sont représentés :

1° Sur une première ligne horizontale, les noms des communes, avec les longueurs de leurs traversés par le chemin de fer.

2° Les travaux d'art de toute espèce, pour la desserte des communications interceptées par le chemin de fer et pour l'écoulement des eaux ;

3° Les paliers et les pentes et rampes, avec indication de leurs déclivités et de leurs longueurs respectives.

4° Puis vient le profil proprement dit, représentant les remblais en rouge et les déblais en jaune.

5° Les cotes rouges de l'axe du chemin, rapportée au niveau moyen de la mer au Havre ; les cotes noires du terrain naturel, au point correspondant ; et enfin, les différences entre les cotes rouges et les cotes noires, ou les cotes de déblai et de remblai.

6° Enfin une ligne horizontale représentant le niveau moyen de la mer au Havre, avec les distances horizontales qui séparent les ordonnées dont les cotes ont été données.

Au dessous du profil en long on figure, de distance en distance, des profils en travers tracés à l'échelle de $0^{m}001$ pour mètre. et représentant surtout les remblais et les déblais importants du tracé ainsi que la forme du terrain dans les points où elles représentent des dispositions exceptionnelles.

III. Un devis explicatif des ouvrages à exécuter pour l'établissement du chemin.

Ce devis comprend

1° La description générale du tracé et la désignation des localités qu'il traverse ou à proximité desquels il passe.

2° La description géométrique du tracé en plan.

C'est un tableau à plusieurs colonnes représentant les alignements droits, et leurs longueurs ; — Les courbes et leurs développements ; les rayons courbés ; la flèche, la corde et les tangentes de chaque courbe ; les angles que font les alignements consécutifs, avec indication du sens dans lequel ils sont formés.

Au moyen de ce tableau, on doit pouvoir refaire le tracé géométrique exact du chemin en plan.

3° Le tableau des rampes, paliers et pentes.

Ce tableau est le relevé du profil en long ; il indique les longueurs des pentes, paliers et rampes ; leur déclivité ; les produits de la déclivité par la longueur, c'est-à-dire les quantités dont on monte et dont on descend au moyen de chaque rampe ou de chaque pente ; et enfin les cotes rouges aux extrémités des pentes, paliers et rampes.

Au moyen de ce tableau, on doit pouvoir reproduire le profil en long du chemin, abstraction faite, bien entendu, de la forme qu'affecte le terrain naturel.

On donne dans ce même chapitre, la description du profil en traverse adopté pour le chemin tant en déblai qu'en remblai.

4° Les ouvrages d'art à construire pour l'écoulement des eaux ou pour le maintien des communications, indiquant la nature de chaque ouvrage, ses dimensions en largeur de débouché, en longueur ou en largeur entre les parapets ; hauteur sous clef ou sous poutres, hauteur du rail au-dessus ou au-dessous du terrain naturel, au point où chaque travail doit être établi ; et enfin quelques mots d'explication sur les dispositions extraordinaires

que chaque travail d'art peut présenter, soit par lui-même, soit par les travaux que ses abords peuvent exiger.

5° Enfin, les emplacements des gares de stationnement et d'évitement, avec indication approximative de leur étendue et les motifs des positions choisies pour leur établissement.

Quand les projets des plans topographiques ont été soumis à l'administration et approuvés par elle, il faut dresser les plans parcellaires qui aux termes du titre *II* de la loi d'expropriation, doivent être soumis aux enquêtes locales ; ces plans sont accompagnés de différentes pièces nécessaires pour satisfaire au voeu de la loi et donner aux parties intéressées, c'est-à-dire aux communes et aux propriétaires dont les terrains sont traversés par le chemin de fer, une idée nette du tort qu'on peut leur causer et de la manière dont leurs terrains sont atteints.

Les dossiers des plans parcellaires comprennent :

1° Les plans parcellaires proprement dits des terrains ou des édifices dont la cession est nécessaire à l'établissement du chemin.

Les plans, dressés à l'échelle de $0^{m}001$ pour mètre, doivent indiquer exactement les limites des terrains à acquérir (limites fixées ou déterminées d'après les considérations que nous avons développés plus haut).

On étend en général, ces plans un peu au-delà des limites nécessaires à l'établissement du chemin, afin de pouvoir, si, par suite d'accident, un élargissement devient nécessaire, acquérir des terrains supplémentaires sans lever de nouveaux plans.

Il importe que ces plans soient dressés avec le plus grand soin ; que l'axe du chemin et les limites des terrains à acquérir y soient exactement figurés ; que tous les changements que les limites peuvent éprouver pendant le cours des travaux y soient constamment représentées.

On ne saurait croire combien de procès s'élèvent après l'achèvement des travaux sur la fixation des limites ; les terrains acquis par un travail d'utilité publique sont inaliénables, et au bout de cent ans d'envahissement de la part d'un propriétaire, l'administration est encore en droit de réclamer le rétablissement de ses limites ; or, les propriétaires riverains des canaux et des chemins de fer sont très disposés à envahir les banquettes ou francs-bords qui existent le long de ces chemins ou canaux, et ces envahissements donnent lieu à des procès continuels, qui prennent un temps énorme aux ingénieurs.

Avec des plans parcellaires bien dressés dans l'origine, corrigés ou modifiés avec soin quand il y a lieu pendant l'exécution des travaux, on évite bien des procès, bien des difficultés, bien du temps perdu ; on ne saurait trop recommander cet objet à l'attention de nos jeunes ingénieurs.

Les dossiers relatifs au dépôt des plans parcellaires dans les communes comprennent :

1° Les plans parcellaires dont nous venons de parler, avec indication des gares de toute espèce des chemins latéraux, travaux d'art etc., destinés à maintenir les communications existantes et l'écoulement des eaux.

On comprend qu'il importe de faire connaître aux parties intéressées comment les voies de communication existantes seront maintenues et modifiées et comment les écoulements d'eau seront conservées ou rétablis.

2° Le tableau des parcelles occupées par le chemin de fer avec indication des noms des propriétaires, tels qu'ils sont inscrits à la matrice des rôles, ainsi que le veut la loi, des propriétaires réels, si on les connaît ; de la superficie de chaque parcelle et des excédants, quand ces excédants sont à peu près dans les limites fixées par la loi.

3° Des profils en long et en travers, à l'échelle du plan parcellaire, tant pour les hauteurs verticales que pour les distances horizontales ($0^{m}001$ pour mètre) avec indication des travaux d'art de toute espèce ; le profil en long explique les nécessités que l'on a pu éprouver pour la construction de certains travaux d'arts.

4° Enfin, une notice explicative comprenant l'indication du tracé, un plan, avec ses courbes et ses alignements droits, l'indication du profil en long, avec ses paliers ses pentes et rampes et leurs déclivités ; l'indication des ouvrages d'art, avec indication des moyens à employer pour maintenir les communications existantes et pour assurer l'écoulement des eaux.

Il faut un dossier pareil, distinct, pour chaque commune.

Quand la traversée d'une commune est trop longue ou renferme beaucoup de courbes, il est impossible de représenter sur une même feuille tous les terrains nécessaires à l'établissement du chemin, il faut alors faire son plan en plusieurs feuilles et il convient de joindre au dossier un plan général de la traversée de la commune, à l'échelle des plans topographiques (de 1 à 5.000) présentant l'assemblage de tous les plans parcellaires.

Ce plan général est aussi nécessaire pour donner aux commissions une idée nette de l'usage et de la situation des chemins qu'il s'agit de desservir et que l'on veut souvent ou détourner ou supprimer.

...que les forces qui s'opposent au mouvement n'excèdent pas les limites d'adhérence des transmissions sur les rails…

Notes prises au cours de chemin de fer

1842 - 1843

Dans l'exposé que Mr Jullien a fait à l'école des travaux exécutés pour l'établissement du chemin de fer d'Orléans, il a donné de nombreux et intéressants détails sur les dispositions généralement adoptées, et particulièrement réalisés au chemin de fer d'Orléans, pour la constitution de la voie, l'exécution des terrassements et des ouvrages d'art, l'établissement des gares, des croisements de voie, etc, etc... Il avait d'ailleurs fait précéder cet exposé de développements étendus sur la théorie de la machine locomotive, telle qu'elle a été originairement conçue et publiée par Mr Guyonneau de Pambour. Cela dispensera de revenir sur ces questions dans les leçons qui vont suivre.

On se proposera seulement d'y traiter un petit nombre de questions fondamentales, qui se trouvent suffisamment définies par les sous-titres suivants :

Des principes qui doivent présider à la détermination des tracés de chemin de fer.

Des inconvénients et des dangers résultant des courbes de raccordement ; et des moyens proposés pour faciliter la circulation des convois dans les courbes de petit rayon.

Des divers systèmes proposés ou mis en pratique pour l'établissement de la voie de fer.

De la rédaction des projets.

Des principes qui doivent présider à la détermination des tracés de chemin de fer.

On a eu l'occasion d'insister, dans le cours de routes, sur cette importante observation que pour toute voie de communication, la voie proprement dite, et les véhicules et les moteurs qui sont destinés à la fréquenter doivent être considérés comme les parties solidaires d'un même ensemble mécanique ; de telle sorte que si l'un des éléments vient à varier, chacun des deux autres doit être presque nécessairement modifié. C'est surtout lorsqu'il s'agit des chemins de fer que cette vérité est palpable, et il suffit en quelque sorte de l'énoncer.

Les conditions d'après lesquelles doivent être établis les tracés des chemins de fer dépendent directement de l'influence qu'exerce sur la marche des locomotives les ondulations du profil longitudinal, en élévation et en plan. Il convient donc d'étudier cette influence. Pour cela, nous ne reviendrons pas sur les formules qui ont été précédemment données ; nous ne présenterons que des résultats numériques, en déduisant de ces formules, ou faciles à déterminer à priori.

Examinons d'abord le mouvement d'une locomotive remorquant un convoi sur une ligne de niveau et voyons l'effet qu'elle est capable de produire, soit quant à l'effort exercé, soit quant à la vitesse.

Pour que la locomotive se mette en mouvement, deux conditions doivent être remplies : il faut d'abord que l'effet à exercer pour déterminer le mouvement n'excède pas les limites des roues motrices sur les rails ; il faut ensuite que la force impulsive de la vapeur sur les pistons fasse au moins équilibre à la somme des résistances de toutes natures qui s'opposent à la marche des pistons. Chacune de ces conditions fixe, pour des états déterminés des machines et des rails, une valeur que ne doit pas dépasser l'effort correspondant à la charge. Ces deux valeurs ainsi obtenues sont généralement différentes. C'est la moindre de ces deux valeurs qui représente l'effort maximum que peut produire la machine.

Supposons qu'il s'agisse d'une machine de 16 tonnes, ayant des roues de $1^{m}67$ de diamètre, et des pistons de 0,355 de diamètre et 0,508 de course, comme doivent être les machines du chemin d'Orléans. — Assez généralement, les roues motrices des machines à 6 roues portent les 0,55 du poids de la machine ; soit, en ce cas, 8 800 K. — l'adhérence peut varier, suivant que le rail est sec ou gras, des circonstances les plus favorables aux circonstances les plus fâcheuses, entre $^{1}/_{5}^{e}$ et $^{1}/_{15}^{e}$ du poids. Si l'on admet comme chiffre moyen $^{1}/_{10}^{e}$, la valeur limite des résistances extérieures que la machine sera capable de surmonter généralement, sera, eu égard à l'adhérence, de 880 Kilogrammes.

Si l'on calcule, d'autre part, la force impulsive de la vapeur sur les pistons, parallèlement à la direction du parcours, on trouvera (au maximum de la pression effective ; soit 4 atmosphères) 1530 Kilogrammes, déduisant 112 kilogrammes pour la résistance propre de la machine, il restera plus de 1400 K pour l'effort maximum qu'elle produirait, si occasionnellement on pouvait obtenir une adhérence suffisante. On voit que, dans l'état présent des charges, l'insuffisance d'adhérence réduit singulièrement le parti qu'il serait possible de tirer de la puissance réelle des machines ; et que, par conséquent, on rendrait à l'industrie des chemins de fer un éminent service si dans les circonstances où la machine doit produire des efforts considérables, il était possible d'augmenter notablement l'adhérence, sans accroître dans le même rapport la résistance au roulement.

On comprend que si l'adhérence devenait égale par exemple au cinquième du poids supporté par les roues motrices, toute la force de la machine pourrait être utilisée.

Le plus grand effort que pourrait aujourd'hui exercer généralement (c'est-à-dire dans la condition ordinaire où l'adhérence = $^{1}/_{10}^{e}$ du poids supporté par les roues motrices) une locomotive de 16 tonnes désignée comme précédemment et cheminant sur un palier parfaitement horizontal, correspondrait à la traction d'un convoi de 260 tonnes remorqué avec une vitesse de un peu plus de $5^{m},00$ par seconde.

En effet, les résistances directes dont la somme ne doit pas dépasser la limite de l'adhérence sont, en cas :

1° Pour la traction de 270 tonnes y compris le tender à 3^{K} par tonne . . . . . 810^{k}

2° Pour la résistance du vent 87.45

En somme . . . . . $897^{k}.45$

effort qui, on le voit, excède déjà la valeur précédemment trouvée pour la limite de l'adhérence de la machine sur les rails.

Le travail utile exercé en ce cas, par la machine est exprimé par $810^{k} \times 5^{m} = 4050^{Kgm}$ ce qui correspond à la force effective de 53 chevaux de vapeur. Si l'on évaluait directement l'action de la vapeur sur les pistons, on trouverait une force nominale de 75 chevaux. L'effet utile est donc de 70 %, encore la charge vraiment utile, celle dont on paie le transport, n'est-elle que les $^{3}/_{5}$ au plus des poids remorqués : d'après les rapports des poids des wagons vides ou chargés sur le chemin de fer d'Orléans, elle se trouverait réduite à environ 130 tonnes.

Le moindre effort que la machine puisse exercer correspond à la traction du tender. On a calculé précédemment (page 11) que la vitesse serait alors d'environ 16 lieues à l'heure, en terrain horizontal, et l'air étant en repos ; c'est-à-dire pour la seule action de la vapeur. Il est bien entendu qu'il s'agit des machines dont il a été question ci-dessus : avec des machines ayant de plus grandes roues et une plus grande puissance de vaporisation, on pourrait obtenir des vitesses de 25 à 30 lieues à l'heure.

Si la machine est appelée à exercer une action comprise entre les limites d'effort qui viennent d'être fixées, ce qu'on considère au départ, au moment où le mécanicien ouvre le régulateur, la vapeur étant au maximum de tension, on voit immédiatement le mécanisme de la machine se mettre en jeu très lentement, les roues motrices tourner sans glissement et entraîner le tender et communiquer à la première voiture un mouvement qui se transmet en s'affaiblissant de proche en proche aux voitures suivantes. A partir de cet instant chaque nouvelle impulsion de la vapeur détermine un accroissement de la vitesse du mouvement mais bientôt, la dépense de vapeur faite par le cylindre augmentant et la tension de la vapeur dans les cylindres baissant en même temps que s'accroît la vitesse, il s'établit une vitesse uniforme et désormais permanente tant que l'état du convoi, des rails, du vent et de la machine ne changeront pas ; et qui est telle qu'il y ait, d'une part, équilibre entre la tension de la vapeur dans les cylindres et la somme des résistances qui s'opposent au mouvement des pistons et, d'autre part, égalité entre le poids d'eau vaporisée utilement par la chaudière et le poids de vapeur dépensé par les pistons. Ce sont les lois de ce mouvement uniforme qui ont été données précédemment.

Supposons maintenant qu'un convoi plus ou moins considérable, remorqué ainsi avec une vitesse uniforme en terrain horizontal, vienne à rencontrer subitement une rampe ; à l'instant même la résistance augmente, la tension de la vapeur dans les cylindres ne se trouve plus suffisante pour faire équilibre à la somme des résistances développées, la vitesse se ralentit progressivement et jusqu'à ce que, (si la rampe n'est pas trop raide et est assez longue) il s'établisse une nouvelle vitesse uniforme qui convienne aux nouvelles conditions dans lesquelles la machine et le convoi se trouvent placées. Durant le mouvement progressivement retardé, le convoi consomme une plus ou moins grande partie de la quantité de travail, représentée par la force vive précédemment acquise. Si la rampe était à la fois très longue et très raide, il se pourrait que cette quantité de travail en réserve ne suffit plus pour aider la locomotive à franchir l'obstacle. D'instants en instants la vitesse diminuerait, la tension de la vapeur dans les cylindres irait constamment en augmentant et atteindrait bientôt une valeur telle, qu'insuffisante pour faire équilibre aux résistances, elle serait plus que capable de surmonter la résistance au glissement des roues ; l'adhérence étant vaincue, les roues tourneraient sur place et immédiatement glisseraient sur les rails en redescendant la pente, tout en continuant à tourner dans le même sens.

Si au lieu d'être égale à $^1/_{10}$ du poids supporté par les roues motrices, l'adhérence était égale $^1/_5$, les effets seraient différents : la tension de la vapeur dans les cylindres croîtrait jusqu'à devenir égale à la tension dans la chaudière ; les soupapes se lèveraient et une portion de plus en plus considérable de l'eau vaporisée s'échapperait en pure perte ; la vitesse tombant bien au-dessous de la limite inférieure correspondant aux conditions normales d'emploi de la vapeur, finirait par devenir nulle et négative, et le convoi ou s'arrêterait ou redescendrait la rampe, les roues, même les roues motrices, tournant sans glissement en sens contraire du sens dans lequel tendrait à les faire tourner la vapeur ; laquelle alors ne remplirait plus que le rôle de modérateur et de frein. On conçoit bien dans quel cas la machine s'arrêterait : c'est dans le cas où les forces développées par la vapeur et par la gravité ne différeraient point assez l'une de l'autre pour que l'excès de la plus grande sur la plus petite put vaincre les résistances propres que devrait développer la machine fonctionnant sur la double action de ces forces opposées. Il est bien clair d'ailleurs que, si les circonstances que l'on vient d'analyser se présentaient, on ne laisserait, dans aucun cas, redescendre le convoi, et que, par le secours des freins, on le maintiendrait sur place jusqu'à ce qu'on eut pu faire venir une ou plusieurs locomotives de secours. On n'a pas fait abstraction des ressources extérieures dont on pourrait disposer dans ces cas exceptionnels que pour faire comprendre plus complètement le mode d'action de la machine, et les obstacles que les rampes peuvent présenter à la locomotive.

Lorsque les rampes sont assez longues pour que l'influence de la vitesse acquise dans les époques antérieures du mouvement ne puisse se faire sentir jusqu'à leur partie supérieure, elles ont pour conséquence d'obliger à réduire dans une proportion considérable le poids des convois que les locomotives pourraient remorquer ; à moins qu'on ne soit dans des circonstances d'exploitation qui permettent d'employer avantageusement les locomotives de renfort. Ainsi la locomotive qui peut remorquer en terrain horizontal 128 tonnes de poids utile ne pourra plus remorquer que 60 tonnes aussi de charge utile sur une rampe de 3 millimètres, 36 tonnes sur une rampe de 6 millimètres, 24 sur une rampe de 9 et 17 sur une rampe de 12. Sur une rampe de 32 millimètres la locomotive ne pourrait plus se remorquer elle-même (suivie de son tender).

Supposons enfin qu'après avoir pris une vitesse uniforme en palier horizontal, ou après avoir gravi une rampe, la locomotive arrive au sommet d'une pente, la vitesse augmentera ; l'accélération de la marche continuera jusqu'à ce que la vitesse ait atteint une valeur limite qui variera suivant la longueur et la déclivité du plan, et le plus ou moins d'ouverture du régulateur. En général, on ne se propose point de donner au convoi une vitesse de plus de 10^m par secondes ; or, cette vitesse peut être entretenue par la gravité seule et nonobstant la résistance de l'air, sur une pente de $0^m,0046$. Si donc la pente est égale à $0^m,0046$, on se servira de la vapeur jusqu'à ce que la vitesse progressivement croissante ait atteint 10^m ; et à partir de l'instant où ce degré de vitesse aura été acquise, on fermera le régulateur. Si la pente est au-dessous de $0^m,0046$, il faudra non plus fermer mais réduire considérablement l'ouverture du régulateur. Si la pente excède cette limite, la rapidité de la marche, si elle est modérée par les freins, dépassera la vitesse voulue, sans que la locomotive fonctionne ; et elle deviendra d'autant plus grande que la déclivité sera plus forte ; pourvu toutefois que la pente ait une suffisante longueur. Les seules forces agissantes sont alors la gravité et la résistance du vent - la force accélératrice se trouve exprimée par

$$\frac{dv}{dt} = g\left((i - K) - \frac{u}{m + M}\, v^2\right) \qquad (1)$$

expression dans laquelle g est la gravité, i l'inclinaison de la pente, K le coefficient du frottement, $\underline{ug}$ la résistance opposée par l'air au convoi marchant avec l'unité de vitesse, m et M les masses respectives de la locomotive et du reste du convoi.

On a d'ailleurs pour l'espace parcourue

$$d\epsilon = vdt = \frac{1}{g} \cdot \frac{Vdv}{i - K - \frac{u}{m + M}\, v^2} \qquad (2)$$

Si l'on compte sur la résistance du vent pour arrêter le convoi sur une pente, il faut que $\frac{dv}{dt}$ devienne nul. En posant donc $i - k = \frac{K}{m + M} v^2$ on aura pour chaque valeur de i la vitesse à laquelle s'établira le mouvement uniforme du convoi, sous les seules actions de la gravité et de la résistance de l'air.

Si l'on fait le calcul de ces valeurs de v en supposant qu'il s'agisse d'un convoi de 12 voitures d'un poids tel que l'ensemble du convoi, y compris la locomotive et le tender, soit de 80 tonnes, on trouve que :

Sur une pente de	0,01	la vitesse sera de	20^m,66	par secondes
----------	0,02	----------	32^m,20	"
----------	0,03	----------	40^m,58	"

Ce sont des vitesses de 18, 29 et 36 lieues à l'heure. — De pareilles vitesses, ou on peut avoir la certitude par quelques expériences faites, n'entraînent point <u>nécessairement</u> de conséquences fatales ; mais elles sont tout au moins effrayantes. — la dernière, celle de 36 lieues à l'heure, est celle qu'aurait à l'extrémité de sa chute un corps pesant tombant de 81^m de hauteur.

Quoiqu'il en soit, il faut remarquer que le degré de vitesse où la résistance du vent fait équilibre à la composante de la gravité agissant sur le convoi ne peut être atteinte qu'à la condition que la pente ait une certaine longueur.

L'intégrale de l'expression (2) ci-dessus est, comme on sait, en supposant la vitesse initiale nulle, au sommet de la pente :

$$\epsilon = \frac{1}{xg\ \frac{u}{m + M}}\ I\left[\frac{i - k}{i - k - \frac{u}{m + M} \cdot v^2}\right]$$

I désignant un logarithme népérien.

On déduit de là que, dans les suppositions qui précèdent (celles d'un convoi de 80 tonnes de 12 voitures, partant du sommet avec une vitesse nulle), le convoi descendant une pente de 0,01, atteindra :

La vitesse de	$5^{m/s}$	quand il aura parcouru	188^{m}
"	$10^{m/s}$	-----"----------"------	830^{m}
"	$15^{m/s}$	-----"----------"------	1990^{m}
"	$20^{m/s}$	-----"----------"------	8600^{m}

Si au lieu de supposer la vitesse nulle au sommet de la pente, on la suppose égale à 5^{m}, au moment du départ, (en admettant dans ce cas comme dans le précédent que la vapeur cesse d'agir dès l'arrivée sur la pente), on déduirait des chiffres ci-dessus les chiffres suivants :

La vitesse sera de	$10^{m/s}$	après un parcours de	642^{m}
"	$15^{m/s}$	-----"----------"------	1802^{m}
"	$20^{m/s}$	-----"----------"------	8412^{m}

On voit qu'il faut qu'un plan incliné de 0,01 ait une assez grande longueur pour qu'un convoi y prenne sous l'action de la gravité une vitesse dangereuse, une pente de cette inclinaison sur 2000 mètres de longueur, si elle était suivie d'une contrepente ou d'une ligne de niveau d'une certaine étendue, ne présenterai que fort peu d'inconvénient à la descente.

Il est peut-être bon d'ajouter que si le convoi était composé d'un nombre moindre de voitures d'un moindre poids, il faudrait, pour requérir la même vitesse, des espaces plus considérables encore ; parce que la force accélératrice aurait diminuée proportionnellement plus que la résistance de l'air ; ce que, par contre, les fortes déclivité qui sont si désavantageuses à la montée pour les convois de marchandise ont aussi l'inconvénient d'être à la descente encore plus dangereuse pour ces convois que pour les convois de voyageurs.

De la discussion à laquelle on vient de se livrer ressortent presque d'elles-mêmes des conséquences qu'il importe de ne point perdre de vue quand on s'occupe des tracés de chemin de fer.

En principe, des pentes tant soit peu prononcées sont très désavantageuses à la parfaite exploitation d'une ligne ; mais l'importance des inconvénients qu'elles présentent varie singulièrement suivant la nature de l'exploitation : les fortes déclivités sont en thèse générale, extrêmement défavorable aux convois de marchandises parce qu'elles obligent à réduire considérablement la masse composant chaque convoi ; elles préjudicient beaucoup moins aux convois de voyageurs, parce que ces convois ne cheminent presque jamais à pleine charge, disposant toujours d'un excès de force qu'on réserve pour les parties difficiles des parcours. Dans ce dernier cas, les pentes n'ont pour conséquence qu'une diminution de vitesse qui, pour peu que la rampe ne soit pas trop longue, est peu sensible sur le temps du trajet total. — Cependant cet accroissement de temps de parcours pourrait dans des cas donnés devenir notable, car, le temps employé à parcourir un kilomètre sur une pente de 0,003 est de 32 à 34% plus long que le temps nécessaire au parcours d'un kilomètre horizontal ; sur une pente de 0,006 l'augmentation de temps est de 70% — sur la pente de 0,11 le temps est doublé.

Dans tous les cas, une conséquence des pentes est d'augmenter notablement la dépense en combustible.

Une pente d'inclinaison déterminée ne peut, en général, être rejetée par le motif seul qu'elle est plus ou moins forte ; car, on a dû voir, par ce qui précède, qu'il importe moins de considérer la déclivité d'une pente que sa position et sa longueur. Si une rampe est très courte et placée à la suite d'une pente en sens opposé, elle sera franchie, fut-elle même très raide, sans difficulté et sans

ralentissement sensible de la marche, en vertu de la vitesse acquise par le convoi. Une même rampe d'inclinaison et de longueur déterminée pourra être ou n'être pas accessible aux locomotives, suivant qu'en raison de sa position sur la ligne de parcours elle pourra être abordée par les convois avec ou sans vitesse acquise : c'est ainsi que sur le chemin de Liverpool les plans inclinés de Sutton et de Rainhill (d'une inclinaison de 0,0104 sur une longueur de 2 kilomètres ½), sont franchis par les locomotives, tandis que sur la même ligne, à la sortie de Liverpool, un plan incliné de même pente et de même longueur (0,0113 sur 2 kilomètres $^{2}/_{10}$) est desservi par des machines fixes.

Quand les pentes fortes devront être courtes, ce sera une circonstance heureuse que de pouvoir les placer au pied des stations : car, à l'arrivée, les convois useront leur vitesse sur la rampe ; au départ, ils reprendront plus vite leur rapidité de marche.

Quand les pentes fortes devront être longues, il sera préférable, au contraire, que les stations soient à leur pied, surtout si ce sont des stations de quelque importance, parce que les convois y devront prendre des locomotives de renfort.

Il suffit d'être mis sur la voie de pareilles considérations pour trouver de soi-même la combinaison qu'on doit rechercher ou s'interdire dans des vues de faible exploitation.

Il sera bon le plus souvent, quand les circonstances le pourront permettre, de n'adopter aucune pente qui fasse anomalie dans le système général des inclinaisons admises sur la ligne. — Cependant, si une exception est absolument nécessaire, il vaudra presque toujours mieux adopter résolument une forte pente qu'une pente intermédiaire, ne dût-on pas dans l'exécution trop chèrement acheter une petite diminution de déclivité ; surtout si le point d'emplacement de cette forte pente n'est point éloigné du lieu naturel de stationnement d'une locomotive de secours, parce que l'emploi additionnel de la locomotive de secours sur la forte rampe permettra de conserver sur tout le reste de la ligne le convoi à pleine charge ; ce que n'eut point permis la pente intermédiaire franchie sans renfort.

La déclivité des rampes franchies par les locomotives en service habituel ne dépasse guère 0^{m},010.

Entre 0,01 et 0,03 les plans inclinés sont desservis par des machines fixes, remorquant à la montée ou retenant à la descente les convois au moyen de cordes.

On n'a guère construit en Angleterre, dans les chemins de grande exploitation, des plans inclinés dont la pente excède 0,027 ou 0,028. — En Belgique, le plan incliné de Liège a une inclinaison de 0,03 sur 1800 mètres de longueur. — Les Américains ont poussé beaucoup plus loin la hardiesse, on pourrait dire la témérité : ils ont, sur de faibles longueurs il est vrai, des plans inclinés de 100 à 200 millimètres pour mètre — c'est un peu trop se confier à la solidité des cordes.

Cependant les cordes sur des plans d'inclinaison ordinaire de 0,01 à 0,03 ne sont pas le seul motif de sécurité qu'aient les voyageurs : si la corde cassait, il serait très aisé de retenir le convoi à l'aide de freins et de l'empêcher de prendre une accélération dangereuse. Le frottement de première espèce ou glissement sans rotation du fer sur fer est d'environ $^{1}/_{10}$;il suffirait donc d'arrêter, en serrant progressivement les freins, la rotation des roues d'un tiers des voiture composant le convoi pour neutraliser complètement la composante de la gravité suivant la pente. Seulement sur un chemin qui offre de pareilles déclivité, il est prudent, on le voit, de faire entrer dans la composition des convois une forte proportion de voitures (du tiers à la moitié) munies de freins.

On peut voir figure 16 les dispositions de freins les plus usitées, et particulièrement (fig. 17) le frein employé sur le chemin de Versailles (rive droite) et de St Germain. L'emploi de ces divers genres de frein offre l'inconvénient d'user et de décentrer les roues. On a adopté pour le plan incliné de Liège un système qui fait reporter, lorsque l'on veut enrayer le poids des voitures, non-plus sur les roues mais sur une espèce de support annexée qui vient s'appuyer sur le rail (fig. 18). On pourra voir une description de ce système dans une des prochaines livraison des annales des ponts et chaussées.

Il y a peu de choses à dire sur les dispositions particulières qu'exigent les plans inclinés desservis par des machines fixes. Il suffira d'indiquer la manière de soutenir les cordes ou de leur conserver la tension convenable, malgré les allongements ou raccourcissements qui peuvent être la conséquence des efforts auxquelles ont les soumet ou des variations hygrométriques.

Les cordes passent sur des poulies qui diminuent leur frottement et les empêchent de s'user aussi rapidement que si on les traînaient sur le sol (fig. 19). Ces poulies sont placées à une distance de 6 à 8^{m}, leurs tourillons ont un diamètre qui varie de 15 à 25 millimètres. Le diamètre de la poulie doit être le plus grand possible, mais les poulies ne devant toucher ni le sol, ni le dessous des wagons, ce diamètre a une limite supérieure généralement égale à 0,40 ou 0,45. — Le rapport $\frac{\delta}{D}$ varie de $\frac{1}{20}$ à $\frac{1}{30}$; le poids propre de chaque poulie est de 25 à 30 kilogrammes. Le poids de corde qu'elles supportent (le diamètre de la corde varie de 0,035 à 0,060 !) est moyennement de 18 à 20 kilogrammes.

Quand le plan incliné est en ligne droite, la poulie est placée verticalement sur le milieu de la voie (fig. 20) ; quand il est en ligne courbe les poulies sont inclinées de manière à diriger la corde dans le sens de la courbe (fig. 21).

Le frottement des poulies est d'environ $\frac{1}{25^{e}}$ du poids combiné de la poulie et de la corde.

Plusieurs moyens ont été employés pour maintenir les cordes en degré de tension convenable. Nous n'indiqueront que le moyen mis en usage au plan incliné de Liverpool.

L'ascension des convois est faite au moyen d'une corde sans fin à laquelle on les attache. Le mouvement de cette corde est produit par son frottement sur un système de poulies ou de tambours dont l'un est mis en mouvement par une machine fixe. — (Il y a presque toujours deux machines fixes, destinées à se relayer mutuellement, pour le cas d'arrêt imprévu ou de réparations). — La corde passe d'abord sur la gorge supérieure de la poulie A, (fig. 22) qui a deux gorges, embrasse plus de la moitié de la circonférence et passe sur la partie supérieure d'une poulie à deux gorges A', de rayon plus petit que A, vient passer autour d'une poulie A'', la contourne, revient sur la gorge inférieure de A', puis sur la gorge inférieure de A, en croisant en direction primitive, et revient enfin à l'extérieur former la seconde partie de la corde qui descend le plan quand l'autre partie monte, ou inversement. – La poulie A'' n'est point fixe comme les autres ; elle est placée sur un chariot mobile dont la position varie suivant la tendance à l'allongement ou au raccourcissement des cordes, et qui est maintenue par un autre poids convenable P placé dans un point ad-hoc.

Les machines fixes coûtent en général moins en entretien et en combustible que les machines locomotives à égalité de puissance et pour un travail durant le même temps. Mais leur emploi a l'inconvénient d'exiger une dépense continue et permanente pour un usage momentané, accidentel. — En outre, il y a toujours temps perdu au passage des plans inclinés desservis par machines fixes ;

car il faut arrêter le convoi pour attacher la corde. Ce sont là des motifs pour éviter l'emploi des plans inclinés lorsque les circonstances le pourront permettre sans de trop grands sacrifices, l'inquiétude qu'ils inspirent en général aux voyageurs est certainement un motif qui est aussi d'un certain poids.

Parfois il paraîtra plus avantageux de percer un contrefort que de le gravir en plan incliné.

Pour le passage des chaînes circonscrivant des bassins de certain ordre, le percement deviendra souvent de nécessité absolue : alors on établit le chemin en souterrain.

Les souterrains des chemins de fer sont habituellement plus grands que ceux construits pour l'établissement des canaux ; mais il est une circonstance qui rend parfois, malgré cela, les prix des uns et des autres assez comparables ; c'est que les souterrains des canaux sont presque toujours dans la vue de mieux assurer l'alimentation du point de partage établis au-dessous du niveau des eaux souterraines ; tandis que les souterrains de chemin de fer doivent être percés le plus possible au-dessus de ce niveau. On conçoit que l'augmentation de dépenses qu'il faut faire pour pour les épuisements, durant la construction des premiers, compense dans une certaine mesure l'accroissement des frais résultant de la plus grande section des seconds.

Il faut dire d'ailleurs que le prix de percement d'un souterrain est bien loin d'être proportionnel, du moins en ce qui regarde l'extraction des déblais, à l'aire de la section qu'on lui donne. Pour les souterrains en grand nombre qu'il a fait exécuter dans des bans de rochers calcaire, pour la construction du canal de Marseille, Mr de Montricher a expérimenté que le percement de la première galerie, dont la section était de douze mètres, avait fait revenir à 18^{fr} le prix d'extraction du mètre cube de rocher ; tandis que pour l'établissement ultérieur de cette même galerie, le prix d'extraction du mètre cube n'avait plus été que de 6 francs.

On n'établit jamais dans les souterrains les dés ou traverses immédiatement sur le fond de rocher ; le roulement des convois y serait trop rude. Loin de là, on établirait plutôt une plus grande épaisseur de ballast que sur toute autre partie de la voie, afin d'assurer plus complètement l'écoulement des eaux à une certaine profondeur au-dessous des rails. On réserve ordinairement au ballast une épaisseur de $0^{m},60$.

La cheminée des locomotives s'élève à 4^{m} au-dessus des rails.

On voit d'après cela que la hauteur d'un souterrain de grande exploitation ne saurait être de moins de 6^{m} à $6^{m}50$, pour peu qu'on veuille conserver d'espace libre au-dessus de la cheminée de la machine. Mais pour l'aérage il est désirable que l'espace restant libre à la partie supérieure du souterrain soit plus considérable. Les gaz carbonés et les vapeurs sulfureuses qui s'échappent de la cheminée ne circuleraient que difficilement dans un si petit espace, et après le passage d'un ou plusieurs convois, on ne pourrait ni respirer, ni voir dans le souterrain. — Dans les derniers projets exécutés ou proposés, on a donné aux souterrains une hauteur de $7^{m},50$ à 8^{m}. On donne aux souterrains une section presque circulaire et un revêtement en maçonnerie dans les terrains qui sont peu solides et susceptibles de s'affaisser par l'action des eaux. Cette précaution est indispensable pour les défendre contre les poussées latérales et de bas en haut. Dans certaines voûtes qui ont été faites en Angleterre sans que cette précaution ait été prise, les piédroits ont cédé à la poussée et se sont rapprochés : et la voie s'est retrouvée détruite.

Quand la longueur du souterrain est un peu grande, il devient nécessaire d'établir des puits d'aérage de distance en distance pour l'éclaircir et l'assainir.

Sur le chemin de Birmingham, au souterrain de Kilsby, dont la longueur est de 2,200^{m}, on a percé deux puits dont la base est formée par des puits hémisphériques de 11 mètres de diamètre. Ces deux puits divisent la longueur du souterrain en trois parties de 7 à 800 mètres, chaque intervalle est divisé en trois parties égales par deux puits d'une moindre ouverture à la base. Les puits gigantesques de ce souterrain sont peut-être un luxe de précautions ; mais un certain nombre de petits puits étaient, en ce cas, et seraient dans tous les cas semblables, nécessaires.

Le prix de construction des souterrains est extrêmement variable : il dépend de la nature des couches à traverser, de leur direction, de leur dislocation, de l'affluence des eaux, de la longueur des percements, de la hauteur des puits à établir pour le déblaiement des extractions, de la nécessité plus ou moins fréquente qui peut se présenter dans l'étendue du souterrain de voûter en maçonnerie des espaces plus ou moins considérables, etc, etc...

Dans certains cas où une voûte sera nécessaire, on pourra se borner à lui donner une brique ou une brique et demie d'épaisseur, comme quand il s'agira seulement de faire un revêtement pour défendre des schistes contre l'action de l'air ; dans d'autres cas, et par exemple quand le terrain sera argileux, il faudra donner à la voûte des épaisseurs considérables.

On peut voir (fig. 23), un tableau qui a été dressé par Mr Minard, et qui donne le prix, la longueur et l'enfoncement sous le sol d'un certain nombre de travaux exécutés en France ou en Angleterre.

Tracés généraux.

Les indications qui précédent semblent suffire pour guider dans les études de détails qui se rapportent au choix et à la distribution des pentes d'un tracé de chemin de fer. Quant à ce qui regarde la détermination générale du tracé, eu égard à la configuration topographique du sol, les principes qui se rapportent à cet ordre de considérations sont à très peu près les mêmes que ceux que nous avons émis à propos du tracé des routes ordinaires, dans le cours de routes. Seulement la nécessité d'appliquer ces principes est, dans le cours des chemins de fer, plus absolue, plus rigoureuse, en raison même des limites beaucoup plus étroites entre lesquelles peuvent varier les pentes à adopter.

En général, les chemins de fer sont destinés à relier entre eux des centres de population, de commerces ou d'industries considérables. Le plus ordinairement ces grands centres seront placés sur des cours d'eau de premier ordre. C'est donc presque toujours entre les pentes inférieures de différents bassins de premier ou de second ordre que devront être établies les communications par chemin de fer.

Pour se rendre d'un bassin dans l'autre, il y aura des faîtes à franchir. Ces faîtes devront être franchis le plus ordinairement dans les points les plus déprimés de la chaîne, dans les cols des faîtes les plus bas parmi ceux qui ne s'écartent point trop de la direction qui, à vol d'oiseau, serait assigné à la ligne. Ces cols correspondent aux points marqués dans la direction, prolongés jusqu'au faîtes des affluents du dernier ordre du bassin : les plus bas seront en général, ceux qui seront indiqués par les cours d'eau pénétrant le plus avant dans la chaîne. Il y aura presque toujours un plus ou moins grand nombre de solutions entre lesquels le choix devra se déterminer non seulement par des vues de facilité et d'économie de frais de parcours, mais par un ensemble de considérations politiques et sociales. Ainsi, par exemple, pour se rendre de Paris à Lyon, ou plutôt de Paris à Dijon,

(cette dernière ville ayant été considérée comme un point obligé de la ligne de parcours) et passer du bassin de la seine dans celui de la Saône, on peut, après avoir suivi la Seine jusqu'à Montereau, confluent de la Seine et de l'Yonne, remonter l'un ou l'autre de ces deux cours d'eau. Dans le dernier cas, quittant l'Yonne à l'embouchure de l'Armançon, on arrive à Dijon en suivant à très peu près le tracé général du canal de Bourgogne. Si l'on suit la Seine, arrivé à Marsilly sur Seine, confluent de la seine et de l'Aube, on a à choisir entre deux directions ; si l'on continue à remonter le premier des deux cours d'eau, on le suit jusqu'à ses sources mêmes et après avoir franchi la Seine on redescend sur la Saône par la petite vallée d'Ignon. Si on prend l'aube, on arrive par un chemin plus long à un point du faîte assez peu éloigné du col choisi dans le tracé précédent et l'on redescend sur la Saône par la vallée de la Tille. Chacun de ces tracés a été, en effet, proposé. On conçoit qu'on ne présentait le plus long, celui de l'Aube, qu'en vue de combinaisons complexes : on considérait, en étudiant ce tracé, qu'il serait possible de faire servir au moins pour un provisoire plus ou moins long, la partie comprise entre Paris et Arcis ou Brienne au double service des chemins de fer de Paris à Lyon et de Paris à Strasbourg, ces deux chemins ne se séparant dans cet ordre d'idée qu'entre Arcis et Brienne. Il pourra se présenter fréquemment des occasions dans lesquelles de pareilles déviations seront proposées : c'est dans les éléments même de chaque question spéciale que les motifs pour admettre ou repousser de pareilles déviations devront être puisées. Nous ne saurions discuter ces motifs, même pour un cas déterminé sans sortir de l'objet de ce cours.

Parfois les déviations de tracé seront déterminées par des considérations d'ordre un peu différent : ainsi, dans le tracé d'Avignon à Marseille, la loi a décidé un allongement de parcours de vingt et quelques kilomètres, pour toucher Arles ; non pas seulement, on le conçoit, en vue de satisfaire aux exigences d'une localité, mais par le motif qu'Arles étant le point où cesse la navigation maritime et où commence la navigation fluviale, on laisserait aux combinaisons diverses qui pourraient être adoptées pour les transports de toute natures s'effectuant dans la vallée par voie d'eau ou voie de terre, combinaisons qui devront varier suivant l'état du fleuve, une beaucoup plus grande liberté, que si le chemin de fer quittait le Rhône en un point plus élevé de son cours, point où les marchandises arrivant du bas du fleuve ou des ports de la Méditerranée, ne pourraient arriver qu'après un transbordement effectué des bâtiments de cabotage sur les bateaux du fleuve.

Nous ne pouvons insister sur ces considérations : il suffit de les avoir indiquées.

En thèse générale, après avoir déterminé les cols de passage d'un bassin à l'autre, on devra se rendre du point de départ à ce col en suivant les affluents de divers ordres qui y mènent par le chemin le plus court. On desservira presque toujours ainsi les intérêts les plus importants : celui de la circulation générale et celui de la circulation locale entre les centres les plus populeux, ces centres étant presque toujours placés sur les cours d'eau.

A mesure qu'on s'élèvera dans les vallées de moindre importance, on trouvera des déclivité plus fortes ; et près du faîte les pentes pourront être impossibles à franchir. C'est en vue des difficultés que doit présenter le faîte, qu'il peut être convenable de s'élever longtemps d'avance sur le flan des versants des vallées de dernier ordre par lesquels on parvient à ces faîtes, afin de répartir sur un plus long espace la hauteur à gravir. Avec cette précaution, il sera possible dans certains cas particulier, de passer sans souterrain, d'une vallée dans une autre dépendant d'un autre bassin. Quand l'établissement d'un souterrain sera nécessaire, il sera possible que ce ne soit plus le col le plus déprimé, mais bien la partie de la chaîne où l'épaisseur à percer sera la moindre qu'il convient

de choisir. Cependant, dans presque aucun cas, la hauteur du faîte au-dessus du niveau du souterrain ne devra être considérée comme indifférente, les dépenses de percement dépendant à beaucoup d'égards, comme on peut le conclure de ce qui a été dit précédemment, de ce plus ou moins de hauteur.

A l'entrée et à la sortie des souterrains, le chemin est toujours établi dans des tranchées plus ou moins profondes ; c'est là un inconvénient auquel il est impossible d'échapper. Mais ce qu'il faut éviter le plus possible, et ce qu'il n'est cependant point toujours facile d'éviter dans les tracés de chemin de fer où l'on est tenu de le maintenir si rigoureusement dans d'étroites limites de pentes et de courbures, c'est d'entrer en tranchées tant soit peu profondes dans les flans de coteaux, surtout lorsque les terrains inférieurs sont de nature argileuse : il en peut résulter des dommages considérables, ainsi qu'on en a fait, sans parler d'autres cas semblables, la fâcheuse expérience dans des chemins exécutés aux portes de Paris.

Un grand nombre de considérations qui ont été développées dans le cours de route, sur les avantages plus ou moins grands que l'on peut trouver à placer un tracé à plus ou moins de hauteur au-dessus du fond de la vallée, et à en choisir l'exposition conformément à des principes déterminés, suivant le climat ou selon la nature du sol, sont dans une certaine mesure applicable aux chemins de fer. Mais les chemins de fer étant 25 ou 30 fois plus coûteux que les routes ordinaires et ne pouvant être par conséquent établis que là où les intérêts les plus puissants les réclame, on conçoit aisément que les considérations qui peuvent être prépondérants pour déterminer le déplacement du tracé d'une route soient réputées tout-à-fait secondaires quand il s'agit d'un chemin de fer. Il faut, toutefois, en conservant à chaque intérêt son ordre d'importance, ne jamais perdre de vue, et ne sacrifier qu'autant que cela peut être indispensable ces conditions qui importent au solide et économique établissement des travaux de la voie de communication qu'on projette.

Nous avons eu principalement en vue, dans tout ce qui précède, les grandes lignes destinées à la circulation générale des voyageurs et des marchandises. Il est des chemins qui sont établis pour des exploitations spéciales et dont le tracé doit par cela même être assujetti à des conditions particulières. Tels sont les chemins qui rattachent de grands établissements de mines à des voies de communication générale ; et, par exemple, à des rivières et canaux : on peut citer entre autres le chemin de St Étienne, de Rive-de-Gier, de Darlington à Stockton, de Bolton, etc. — En pareil cas, il s'agit presque toujours d'amener d'un point plus ou moins élevé à quelque point beaucoup plus bas une masse considérable de produits encombrants tirés de la mine, et de remonter à peu près à vide les wagons qui ont servi à la descente de ces produits. Alors on peut adopter, quand le terrain s'y prête, des pentes assez fortes pour que les convois descendent sans prendre une excessive augmentation de vitesse, sous la seule action de la gravité, et faire opérer la remonte par des chevaux descendus dans les wagons avec le convoi précédent ; ou, si les déclivités naturelles du sol sont telles qu'on puisse avantageusement employer les locomotives, déterminer un tracé tel que les machines fonctionnent en exerçant, à très peu près, le même effort de traction lorsqu'elles remorquent à la descente les wagons chargés, ou à la remonte des wagons vides. Ce sont des problèmes qu'au moyen des indications données précédemment on résoudra sans peine dans chaque cas donné.

Quand les plans sur lesquels la descente et la remonte doivent s'opérer sont assez courts pour qu'on puisse y établir un pareil système, on se sert de la gravité qui entraîne les wagons pleins à la

descente, pour remorquer à la remonte les wagons vides ; il suffit pour cela d'attacher les deux convois, l'un placé au sommet du plan, l'autre placé à la base, et sur deux voies différentes aux extrémités d'une corde venant s'enrouler sur une poulie de renvoi (fig. 24). Ce système constitue ce qu'on appelle en Angleterre *système Self-acting* ; et ce qu'on désigne en France sous le nom de *plan automoteur*.

Des inconvénients et des dangers résultants des courbes de raccordement et des moyens proposés pour faciliter la circulation des convois dans les courbes de petit rayon.

Dans les chariots de roulage qui circulent sur les routes ordinaires, les roues sont mobiles autour des essieux ; l'essieu de derrière est fixement uni au corps de la voiture, l'essieu de devant, au contraire, n'y est rattaché que par un boulon vertical qui le traverse en son milieu et auquel on donne le nom de cheville ouvrière ; enfin, les roues de devant sont d'un assez petit diamètre, pour pouvoir, en tournant autour de la cheville, s'engager dans le corps du chariot plus ou moins avant.

D'après ces dispositions, une voiture à 4 roues peut toujours être placée sur une courbe quelconque (pourvu que le rayon n'en devienne pas trop petit) d'une manière telle que les deux roues d'un même côté étant posées sur la courbe, chaque essieu soit dans une direction normale à la courbe au point qu'occupe la roue (fig. 25). Si dans cette situation du chariot, on exerce sur le milieu de l'essieu d'avant-train un effort de tirage perpendiculaire à cet essieu, chaque roue extérieure décrira un élément de la courbe, et chaque roue intérieure un élément d'une courbe concentrique ; de telle sorte que les espaces parcourus par les milieux des essieux seront les mêmes, mais que la longueur relative des éléments décrite par les roues d'un même train, seront proportionnelles aux distances comprises entre les roues et le centre correspondant de courbure. Le tirage transmis à l'arrière-train par la flèche, faisant avec cette flèche un angle égal à l'angle de convergence des deux essieux, tendra, durant le mouvement, à maintenir l'arrière-train dans une position normale à la courbe ; et conséquemment, si, après le parcours d'un premier élément, la force de tirage (toujours dirigée parallèlement à l'élément à l'origine duquel se trouve l'avant-train) continue à agir, les roues décriront de la même manière un second élément ; et successivement le chariot parcourra la courbe toute entière sans qu'il se produise autre chose qu'un frottement (par glissement) sur les couronnes ou lisoir de l'avant-train, un frottement de première espèce (par glissements) dans les boîtes des essieux et un frottement de 2e espèce (par roulement sans glissement) à la circonférence des roues.

On a vu pour quels motifs il était désirable, même dans des conditions défavorables à la circulation dans les courbes, de ne point admettre dans les routes ordinaires de courbes de trop petits rayons. Mais on a vu aussi que ces courbes étant naturellement très courtes et d'ordinaire très peu nombreuses sur des étendues de parcours assez considérables, elles ne constituaient pas en général un obstacle suffisant pour déterminer une réduction du chargement.

Les choses sont tout autre sur les chemins de fer : les rayons de courbes devant être sur ces voies beaucoup plus grandes que ceux des routes ordinaires, ces courbes ont le plus souvent un développement très étendu et leur ensemble constitue parfois une fraction très notable de la longueur de la ligne. Comme de plus, l'augmentation du tirage y est très appréciable, elles peuvent devenir et deviennent fréquemment une cause de la diminution de la vitesse ou du chargement.

L'augmentation du tirage tient aux frottements rudes qu'exercent, sur la face supérieure des rails, la partie quasi horizontale de la bande de quelques unes des roues, et sur le côté des rails, les rebords qui maintiennent les roues sur les rails.

A le différence de ce qui a lieu sur les routes ordinaires, les roues des voitures ou wagons qui cheminent sur les chemins de fer sont fixées à l'essieu ; et les roues d'un même train ont conséquemment un mouvement solidaire. Comme, en outre, les essieux sont maintenus dans une position invariable par rapport au corps de la voiture ou du wagon, par les collets qui les emboîtent, les essieux d'une même voiture restent constamment parallèles entre eux. Il résulte de cette double disposition que si les quatre roues d'un wagon sont de même diamètre elles doivent en roulant faire exactement le même chemin. Or, comme dans les courbes les roues extérieures doivent parcourir plus de chemin que les roues intérieures, il faut donc que, d'instant en instant, il y ait un glissement à frottement rude qui fasse gagner aux roues extérieures l'excès de parcours dont elles ont besoin. Ce glissement est forcément déterminé par la réaction qu'exercent latéralement les rails contre les rebords de la roue extérieure de devant et de la roue intérieure de derrière ; il est, en partie, gêné par l'action de la force centrifuge, et aidé par l'action de la force centripète qui résulte de l'obliquité du tirage. Il est d'ailleurs atténué par la conicité de la bande des roues.

L'augmentation des résistances, l'accroissement d'usure des roues et des rails qui en est la conséquence et le danger qu'il pourrait y avoir si, sous l'action combinée de la force centrifuge et du mouvement de trépidation des rails, la locomotive ou quelque wagon s'échappait suivant la tangente en passant au-dessus du rail extérieur, ont déterminés jusqu'à présent à ne point adopter généralement, dans les parties du chemin de fer qui doivent être parcourues à grande vitesse, des courbes au-dessous d'un rayon de 500 mètres. Cette condition jointe à celle de l'extrême réduction des pentes, crée, dans les vallées étroites et immenses, de très grandes difficultés au tracé et à l'exécution économique des chemins de fer.

Divers moyens ont été proposés pour remédier aux inconvénients de la solidarité de mouvement des roues et du parallélisme des essieux, et pour permettre par suite l'adoption des courbes de plus petit rayon.

M. Laignel, ingénieur mécanicien, a proposé de faire monter dans les courbes, le rebord de la roue extérieure sur un élargissement du rail, en maintenant d'ailleurs ce rebord par un surhaussement du reste du rail (fig. 26). Par cette disposition, si la roue intérieure d'un essieu isolé décrit une courbe de rayon $\overline{R}$, l étant la largeur de la voie, r le rayon des roues et h la hauteur du rebord, la roue extérieure décrit naturellement par rotation sans glissement un cercle dont le rayon $l + R = l + \frac{r \cdot l}{h}$; — et le rayon que doivent avoir toutes les courbes sur le même tracé, est constant et égal, si on le mesure à partir du milieu de la voie, à $\frac{l}{2} + \frac{rl}{h}$.

Ce système est ingénieux et il offre cet avantage particulier qu'en même temps qu'il remédie dans une certaine mesure, à la fixité des roues sur les essieux, il crée par le relèvement de la roue extérieure une composante transversale de la gravité qui vient plus ou moins contrebalancer l'action de la force centrifuge. — On sait déjà que le surhaussement du rail est admis dans la pratique habituelle du chemin de fer pour produire un semblable effet. Mais il y a à objecter à l'emploi général de ce système des considérations qui semblent présenter de la gravité.

Il faut remarquer d'abord que le parallélisme des essieux n'étant point détruit et s'opposant toujours à ce que chacun des essieux d'une même voiture ait le centre de rotation qui lui conviendrait, la combinaison de M. Laignel ne détruit qu'un des deux inconvénients produit par le mode actuel de construction des locomotives et des wagons. Si des glissements ne s'étaient pas manifestés d'une manière marquée (et il ne semble point qu'il en ai été ainsi) dans les expériences que ce mécanicien a faites en partie, ce n'aurait pu être que parce qu'il aurait laissé aux essieux du chariot grossièrement construit qu'il a employé dans ces expériences, assez de jeu dans les boites pour qu'ils puissent prendre des dispositions convergentes ; et il est bien clair qu'une pareille disposition présenterait de redoutables dangers dans leur application à des wagons circulant sur des chemins de fer à grande vitesse.

En second lieu, l'invariabilité du rayon des courbes est un inconvénient réel : sans doute, il est toujours possible de former des courbes composées d'une série de parties circulaires et de portions droites dont la forme générale ne s'écarte point trop du tracé déterminé par un cercle continu de rayon quelconque. Cependant, on conçoit que cela ne permette point d'épouser les contours sinueux des vallées étroites autant qu'il le faudrait pour échapper à la nécessité de grands remuement du sol.

Troisièmement, le surhaussement qui conviendrait à la roue extérieure de la locomotive n'est pas le même que celui qui est nécessaire aux roues extérieures des wagons pour la description du cercle de même rayon. Toute les roues du convoi devraient avoir même diamètre et même hauteur de rebord.

Quatrièmement, le cercle qui serait décrit par un essieu isolé, en vertu du roulement sur le rebord, serait, en raison des dimensions actuellement attribuées aux roues, à la voie et aux rebords, d'environ 35^{m} en raison du parallélisme des essieux. Le cercle naturellement décrit dans les mêmes conditions par un wagon à 4 roues, serait, sans doute de 70 à 80^{m}. Il est très douteux qu'on se hasarde à parcourir en service journalier de pareilles courbes avec de très grandes vitesses, et cependant on ne pourrait, dans le système proposé, augmenter ces courbures dans des proportions convenables (de 150 à 200^{m}) sans réduire la hauteur des rebords ou sans augmenter le diamètre des roues plus qu'il n'est possible de le faire.

Par ces motifs, il ne semble point que le système de M. Laignel puisse être avantageusement employé sur les parties de chemin de fer parcourues à grande vitesse ; mais, il est certain qu'il peut être fort utile (surtout parce qu'il n'oblige à aucune modification du matériel) dans les gares et généralement sur toutes les voies secondaires de service.

M. Arnoux, ancien élève de L'École Polytechnique et administrateur des Messageries Lafitte et Caillard, a proposé un système qui rend aux roues leur mobilité autour des essieux et assure aux essieux la convergence qui leur convient suivant le rayon des courbes. Il a fait plus : il a dépensé des sommes considérables pour faire l'essai en grand de ce système avec une locomotive et des voitures construites ad hoc, sur un chemin de fer établi pour cet effet à St Mandé en formant un circuit fermé et tracé de manière à présenter des pentes et des paliers, ainsi que des parties droites et des parties courbes de rayons divers, et jusqu'à une portion de cercle du rayon de 50 mètres. De nombreuses expériences faites à la vitesse de 10 lieues à l'heure ont démontré que les combinaisons imaginées par M. Arnoux étaient réellement dignes de fixer l'attention des ingénieurs.

D'après ce système chaque voiture est composée d'un avant-train et d'un arrière-train. Dans chaque train l'essieu est traversé par une cheville ouvrière autour de laquelle il peut tourner. Une couronne horizontale qui y est attachée à même axe que la cheville ouvrière. Les roues sont libres sur les fusées.

Les deux trains sont réunis par une flèche à brancher, aux extrémités de laquelle sont attachés, en dessous, des plateaux concentriques aux chevilles ouvrières et qui tournent à frottement doux sur les couronnes. Les couronnes faisant corps avec les essieux des deux trains ont le même diamètre.

Des chaînes attachées à la circonférence des couronnes, de manière à se croiser sous la flèche, unissent ces deux essieux et les obligent à se mouvoir simultanément et en sens contraire autour des chevilles ouvrières, en formant respectivement avec leurs directions primitives des angles dont la valeur est la même et est égale à la moitié de l'angle de convergence.

Les voitures sont liées l'une à l'autre

1° par un timon traversé par la cheville ouvrière de l'arrière-train de la voiture qui précède, et par celle de l'avant-train de celle qui suit ;

2° par deux chaînes qui se croisent sous le timon et qui sont attachées, d'un bout, à la circonférence de la couronne de l'avant-train de la seconde voiture, et de l'autre bout à la circonférence d'une couronne, d'un rayon convenablement déterminée, fixée à la flèche de la première voiture et traversée par la cheville ouvrière de l'arrière-train.

Ainsi il y a trois couronnes horizontales à chaque voiture : deux de même rayon sont fixées aux essieux et une autre, d'un rayon généralement différent, fait corps avec la flèche à l'arrière-train.

Il résulte de cette dernière disposition que la flèche de la première voiture ne peut changer de direction sans produire en même temps le changement de la direction des essieux de la seconde voiture ; et, en déterminant convenablement le rayon de la petit couronne, les essieux de la seconde voiture seront, comme ceux de la première, normants à la courbe que les deux voitures parcourent.

Supposons que les timons des voitures soient égaux aux flèches ainsi que cela s'est trouvé établi pour la plupart des voitures mises en expérience par M. Arnoux, dans le chemin d'épreuve de St Mandé ; les couronnes faisant corps avec la flèche aux arrière-trains des voitures devront être d'un rayon moitié des couronnes des essieux.

Soient en effet *AB* la flèche de la première voiture, *BC* la position que prendra le timon de la seconde sur la courbe *ABC*, intermédiaire entre celle des deux rails ; l'angle que forment la ligne *AB* et le prolongement *BK* de la ligne *BC* est double de celui que chacune de ces lignes forme avec la tangente au cercle au point *B*.

Or, *e′e′* position du premier essieu de la seconde voiture devant converger vers le centre, et être normale à la circonférence *ABC*, au point *C*, fera avec son ancienne position *ee* perpendiculaire à *CB″* un angle moitié de *BCB″*, lequel angle *BCB″* = l'angle *KBA* dont la flèche de la première voiture a tourné par rapport au timon de la seconde.

Il faut donc pour rendre le premier essieu de la seconde voiture normal à la courbe imprimée à ces essieux un mouvement angulaire moitié du mouvement angulaire relatif de la flèche et du timon ; et il suffit pour cela d'attacher, comme il a été dit, à la flèche de la 1^{ére} voiture, à l'arrière-train, une couronne d'un rayon égal à la moitié du rayon de la couronne de l'essieu d'avant-train de

la voiture suivante, et de rendre les mouvements de ces couronnes solidaires par des chaînes à la Vaucanson croisées.

Pour compléter le système, en donnant la direction de convergence au premier essieu de la première voiture, quatre galets mobiles autour d'axes verticaux et placés par couples aux extrémité de fourches en fer placées sous l'essieu de devant de la machine viennent s'appuyer par leur gorge contre les faces intérieures des rails et maintiennent ce premier essieu dans une position constamment perpendiculaire aux rails.

Ces combinaisons sont certainement très ingénieuses et d'une application facile. Néanmoins elles présentent de graves inconvénients que nous allons énumérer :

1° Toutes les roues sont solidaires : donc, quand un convoi sera à moitié sorti d'une courbe, ou à moitié entré, l'action des chaînes de communication tendant à amener les essieux des derrières voitures dans la position relative convenable pour la courbure du point où se trouvent les premières, il y aura un frottement latéral considérable. Mais ceci n'est qu'un mal qui ne se fait sentir que pendant des temps très courts.

2° Il faut un temps beaucoup plus long que dans le système actuel pour augmenter ou diminuer le nombre de voitures composant un convoi.

3° Un convoi ne peut marcher que dans un sens, d'abord parce qu'il n'y a de galets directeurs qu'en avant, ensuite parce que pour changer de sens il faudrait aussi changer les communications de mouvement par les couronnes qui devraient être placées en ordre inverse. On ne peut donc pas reculer.

4° Dans les gares et sur les voies de service il arrive à tout instant qu'il faut faire avancer ou reculer une voiture pour la séparer d'un convoi ou pour l'y réunir, ces voitures isolées n'auront plus rien qui guide leurs essieux, et en conséquence elles ne pourront être dirigées et maintenues sur les rails.

5° Le système se mouvant en quelque sorte tout d'une pièce, la force d'inertie qu'il opposera à la mise en marche pourra être assez considérable pour que les roues motrices glissent sur les rails. Dans la disposition actuelle, les voitures peuvent s'écarter et se rapprocher plus ou moins les unes des autres, grâce à la flexibilité des chaînes et des ressorts qui les unissent. En général, au moment du départ, les chaînes sont lâches : il en résulte que la force de la traction de la machine ne s'attaque à la deuxième voiture qu'après avoir mis en mouvement la première ; à la 3e qu'après avoir entraîné les deux précédentes, et ainsi de suite successivement.

Dans le système Arnoux, au contraire, il faut que toute la masse soit mise en mouvement d'un seul effort : et il devra arriver fréquemment que cet effort dépasse les limites de la force d'adhérence.

6° Les roues sont mobiles autour des fusées des essieux, ce qui conduit à donner à ces fusées un diamètre beaucoup plus grand que celui qui est adapté pour les tourillons des essieux des voitures actuelles, et ce qui par suite augmente très notablement le travail des frottements. Cet inconvénient est très grave, puisqu'il mène à cette conséquence directe que pour atténuer les inconvénients des courbes qui ne forment en général que la moindre partie de la longueur d'un chemin de fer, on augmente,

dans une forte proportion, l'effort de traction de la machine sur tout le reste de la ligne.

Ce n'est pas là seulement une prévision théorique. En appliquant le dit manomètre à style à la machine, dans des expériences faites à St Mandé, on a trouvé que l'effort moyen exercé par la locomotive remorquant cinq voitures, de poids ensemble 17 049 K., avait été de 130 kilogrammes ; or, en évaluant séparément l'influence des pentes, on déduit de ce résultat que l'effort exercé sur la courbe supposée horizontale, a été d'environ 5^{K},6 par tonne. C'est là un effort double de celui qui résulte de l'emploi des wagons ordinaires en ligne droite sur un terrain horizontal. Sans doute, il est possible que les courbes à petit rayon que renfermait le chemin d'expérience de St Mandé aient contribué à élever les chiffres de tirage ; mais il sera impossible de ne point attribuer la plus forte part de cet accroissement d'effort à l'augmentation du diamètre des fusées : inconvénient qui semble être inhérent au système et qui nous paraît présenter une très haute gravité.

Si l'on pèse ces objections et particulièrement la troisième et la dernière, on pensera, sans doute, que le système Arnoux, malgré son mérite incontestable, ne sera point susceptible d'application en service ordinaire, tant qu'il n'aura reçu de notables perfectionnements.

Dans le système suivant (système Wilback) un faux essieu qui traverse la cheville ouvrière de chaque train d'une voiture supporte deux demi essieux auxquels sont fixés les roues, (fig. 26). On réalise ainsi à la fois ces deux conditions : mobilité autour d'un axe vertical, liaison des roues à leurs essieux.

Pour déterminer la convergence, deux tringles fixées l'une à l'essieu de l'avant-train, l'autre à celui de l'arrière-train, viennent s'engrener sur une roue dentée à axe vertical. Le mouvement de cette roue, dans un sens ou dans l'autre, rapproche ou écarte les points *A* et *A′* d'attache des deux tringles sur les essieux, et force les essieux à former un même angle avec leurs directions primitives.

Le mouvement est donné à cette roue au moyen d'un pignon à engrenage conique dont la manivelle forme saillie en dehors du plan latéral des voitures. Des repoussoir qui lèvent ou abaissent la manivelle au degré convenable sont placés au commencement et à la fin de chaque courbe et déterminent le mouvement. Le ressort qui s'appuie sur l'engrenage ne permet pas que les essieux se déplacent sous une autre influence que celle du repoussoir.

L'emploi de ces repoussoirs présente un grave inconvénient : il nécessite un choc qui doit être évité avec un soin extrême dans des circonstances où il s'agit de masses énormes mues avec une grande vitesse. Les engrenages seraient incessamment brisés. Ce moyen dangereux peut en outre être inefficace car il est possible que la manivelle n'atteigne pas le repoussoir, durant quelqu'un de ces mouvements oscillatoire jusqu'aujourd'hui si commun dans la locomotive par chemin de fer.

Si ce système était assez perfectionné pour devenir d'un emploi usuel, il aurait sur le précédent le grand avantage de pouvoir être appliqué à tout ou partie d'une ligne, sans exiger la reconstruction presqu'intégrale de tout le matériel.

Il en a été présenté plusieurs autres parmi lesquels on peut citer ceux de MM. Chesneaux et Verrier. Mais il n'y a point à discuter quant à présent le mérite de ces divers systèmes qui sont tous restés à l'état de projets.

Établissement de la voie

Il y a plusieurs choses essentielles à considérer dans les questions qui se rapportent à l'établissement de la voie ; savoir :

1° La largeur de la voie ;

2° Le mode d'établissement de la voie ;

3° L'écartement des supports et les dimensions des rails ;

4° La forme du rail et les systèmes d'attache.

Nous allons examiner successivement ces différentes questions.

1° Largeur de la voie.

Dans les chemins de fer construits jusqu'à présent en France (au moins dans ceux qui ont une certaine importance) la distance entre les rails a été fixée à $1^{m}50$ d'axe en axe, ou à 1,44 entre les arrêtes intérieures des rails. L'économie qui résulte pour le commerce de transports effectués sans transbordements sur une très grande longueur de parcours, fait presque désormais une nécessité d'adopter cette même largeur de voie pour tous les chemins qui devront être mis en communication directe avec les chemins déjà construits.

On concevra l'importance de cette considération, si on remarque qu'à chaque point où les colis doivent être changés de voiture, il y a à supporter les frais d'entretien de commissionnaires surveillants, des frais de camionnage d'une voiture à l'autre et des frais de mise en état de barils, futaille, toile, etc. qui enveloppent ou enferment les marchandises et qui éprouvent nécessairement des avaries dans les fréquents remaniement des objets transportés.

Ces dépenses, dont parfois on ne tient pas assez de compte, sont d'une telle importance que sur de longues ligne de transport par eau, le prix total de transport, eu égard à ces frais additionnels, peut devenir égal et même supérieur (les péages n'étant compris dans l'évaluation ni départ ni d'autre) au prix du transport effectué sans transbordement par voie de fer.

Ce motif de donner à toute la ligne d'un même réseau la même largeur de voie est une considération déterminante pour conserver la largeur de $1^{m}50$ adoptée jusqu'ici.

Et pourtant il est peut-être regrettable qu'on ait adopté primitivement une largeur trop restreinte qui, obligeant à resserrer les pièces du mécanisme de locomotive dans un trop étroit espace, deviens une des principales causes des frais énormes de réparation des machines dans lesquels on se trouve entraîné. Ces dépenses, en effet, constituent une très forte partie des frais généraux et absorbent une portion considérable des produits bruts de péage perçu.

Or tous les mécaniciens constructeurs anglais s'accordent sur ce point, qu'en donnant un peu plus de largeur à la voie, en l'augmentant de 15 à 16 centimètres, on pourrait arriver à donner à ces pièces assez de force et assez de jeu pour qu'il en résulte dans les frais de réparation de très importantes économies.

L'augmentation de la largeur aurait un autre avantage : celui de présenter plus de stabilité pour les voitures, dont les roues seraient plus distantes ; de permettre par suite d'augmenter le diamètre de ces roues sans diminuer la stabilité sur la voie ; et conséquemment d'accroître la vitesse, sans multiplier au-delà de toute limite le nombre des oscillations du piston.

Le chemin de Londres à Bristol a 2.20 de largeur et des roues motrices de 7 ou 8 pieds anglais. Ainsi, y obtient-on sans effort une vitesse moyenne ordinaire de 10 à 12 lieues à l'heure.

Il est permis de penser que la largeur de voie du chemin de Bristol est exagérée, parce qu'elle entraîne comme conséquence nécessaire un trop grand renforcement des essieux, un trop grand accroissement du poids des voitures, et par suite une augmentation très coûteuse du poids des rails. Elle exige aussi une notable augmentation du rayon des courbes.

Mais, peut-être y aurait-il, sans tomber dans cette exagération, quelques avantages à concéder l'augmentation de largeur de voie que réclament les constructeurs de machine.

Du reste ce changement pourrait être fait sans qu'il y ait à apporter dans les dimensions actuellement adoptées pour la construction du chemin aucune modification notable.

Il suffirait de prendre les 15 centimètres que l'on donnerait en plus à chaque voie, sur la largeur actuellement attribuée à l'entrevoie et qui serait réduite de $1^{m}80$ à $1^{m}50$.

La seule difficulté qui puisse s'opposer à l'adoption d'un pareil changement, résulterait de la très grande importance des dépenses à faire, pour le changement du matériel de transport ; mais cette difficulté est grave et peut-être les progrès réalisés de jour en jour dans l'établissement des machines conduiront-ils à résoudre le problème d'un transport prompt, sûr et économique, par le perfectionnement du mécanisme des locomotives avant qu'on ait trouvé à l'augmentation de la voie un assez grand intérêt pour faire les dépenses auxquelles un changement de largeur de voie ne manquerait pas d'entraîner.

2° Mode d'établissement de la voie

Les rails doivent conserver leur hauteur, leur parallélisme et leur affleurement au joint, conditions essentielles pour le roulage et dans lesquels il est d'autant plus difficile de les maintenir que les véhicules ont plus de masse et de vitesse.

On a d'abord établi les rails sur des dez en pierre de $0^{m}30$ de côté et de $0^{m}20$ d'épaisseur, espacés de milieu en milieu de 90 centimètres. On s'est bientôt aperçu que des dez de ces dimensions n'avaient point une suffisante assiette sur le sol ; et on porta les dimensions superficielles du dez à $0^{m}60$ sur $0^{m}60$, et l'épaisseur à $0^{m}30$. Malgré cette modification, les dez n'ayant entr'eux que la solidarité qui pouvait résulter de leur liaison par les rails supportés, ont continué à se déverser soit dans le sens du rail, soit latéralement de manière à déterminer des ondulations du rail en élévation et en plan. Si les ondulations avaient été les mêmes sur les deux lignes de rails composant la voie, l'inconvénient aurait été déjà très grave ; mais les deux lignes, n'étant point solidaires, devaient plutôt subir des effets inverses que des effets semblables et simultanés ; par suite, la largeur de la voie pouvait se trouver gravement modifiée et avoir pour conséquence ou des augmentations considérables de frottement latéral, ou des dangers de déraillement. On a proposé pour remédier en partie à ce défaut de solidarité des dez d'une même ligne, de lier ces dez par une maçonnerie cimentée ; mais les frémissements continuels qu'occasionnent le passage des convois ne tarderaient pas à désagréger les massifs de maçonnerie, les mortiers n'étant pas susceptibles de se prêter à tous ces mouvements sans perdre la faculté de cimentation qui leur sont propres. Ce qu'il importait de trouver était un corps à interposer entre les

rails et le sol, qui satisfit en même temps à ces conditions : de présenter une suffisante assiette sur le sol, d'établir le plus de solidarité possible entre les deux lignes de rails et d'offrir une rigidité et une élasticité telles que sans donner lieu à des chocs rudes, il s'opposât fermement à des dépressions trop marquées. Le bois satisfaisait parfaitement à toutes ces conditions : aussi malgré l'inconvénient qu'il présente d'être sujet à se pourrir plus ou moins promptement et d'exiger par suite des remplacements plus ou moins fréquents et plus ou moins dispendieux, est-il préféré maintenant par la généralité des constructeurs de chemin de fer. On a employé le bois sous forme de traverses reliant les deux lignes (fig. 28). C'est le système le plus habituellement en usage, on l'a employé aussi sous forme de longrines soutenant le rail de chaque ligne de manière continue, l'écartement de ces longrines se trouvant d'ailleurs maintenue de distance en distance par des pièces transversales en bois ou en fonte, et par des tirants en fer. C'est là le mode qui a été originairement préféré en Amérique (fig. 29). Dans ce dernier système, il faut, selon nous, considérer l'ensemble de longrines et des traverses comme constituant la partie résistante de la voie, et la bande de fer qu'on superpose au bord intérieur des longrines comme n'ayant d'autres objets que de réduire la résistance au roulement au chiffre qui correspond au roulement du fer sur fer. On conçoit que dans un pays couvert de forêts, où le bois était à vil prix et le fer à un taux relativement très élevé, un pareil système ait dû présenter de très grands avantages. Il est vraisemblable que dans certaines localité de nos pays d'Europe, ce mode pourrait être aussi très utilement employé. Peut-être s'est-on un peu trop hâté de délaisser ce système, pour adopter partout des dispositions qui jettent nécessairement dans des dépenses beaucoup plus élevées.

Sur le chemin de Londres à Bristol où, dès l'origine, beaucoup de nouveautés ont été introduites, on a adopté à la fois des longrines, des traverses et des tirants transversaux en fer, en même temps qu'un rail de forme particulière (fig. 30), dont la section n'était pas moindre que celle des rails habituellement employés sur les chemins où il n'y a point de longrines. En outre, on avait jugé à propos de faire reposer les longrines sur les têtes de pieux placées de distance en distance et complètement engagés dans le sol. Cet essai de pilotis n'a point été heureux : chaque tête de pieu constituant un point plus résistant que tout autre point de la ligne de longrine, il se formait sous le passage des convois une oscillation verticale d'une tête de pieu à l'autre, et la continuité et la régularité de ces oscillations produisait sur les voyageurs un effet de malaise indéfinissable et très analogue au mal de mer. Il a fallu faire disparaître ces pieux. — On peut penser aussi qu'il y a prodigalité dans l'emploi simultané de fortes longrines et de rails d'un poids élevé : il ne semble pas que le constructeur de ce chemin, qui est pourtant un ingénieur distingué, se soit assez rendu compte de l'action particulière qu'il se proposait d'obtenir de chacune des parties de son système. Il semble qu'il fallait, ou ne point mettre de longrines, ou de réduire notablement le poids du fer.

Aujourd'hui, le mode d'établissement de la voie presque exclusivement employé est celui qui a été décrit lorsqu'il s'est agi du chemin de fer d'Orléans : ce mode consiste à prendre des rails d'une section telle qu'ils puissent supporter sans prendre une inflexion trop forte les poids des véhicules qui doivent circuler sur la voie, à relier les deux lignes de rail constituant la voie par des traversines en bois offrant une assiette suffisante, et à faire reposer ces traversines sur une épaisse couche de sable qui répartit encore, en vertu des propriétés qui sont propres à cette substance, la pression supportée par ces traverses, sur une plus grande superficie du sol inférieur.

3° De l'écartement des supports et du poids des rails.

Depuis l'établissement du chemin de fer de Liverpool, il s'est manifesté une tendance peut-être fâcheuse, en même temps qu'on augmentait de plus en plus le poids des locomotives, à accroître progressivement l'écartement des traverses et le poids des rails. Ainsi la longueur du rail de 15 pieds anglais (4^m50) qui avait été divisée au chemin de Liverpool en cinq intervalles de 3 pieds chacun (0^m91) a été partagée lors de construction du chemin de Londres à Birmingham en quatre intervalles seulement, et le poids a été porté de 55 à 70 livres anglaises. Mais on n'a point tardé à reconnaître, sur ce dernier chemin, que malgré l'augmentation du poids des rails et eu égard à l'accroissement correspondant du poids des machines, l'écartement de 1^m12 était trop grand ; et l'on a rétabli la division en cinq sur la plus grande partie de la ligne.

Sous un poids en repos, les flèches que peuvent prendre des pièces supportée ou encastrées dans des appuis sont directement proportionnelles aux cubes des écartements des appuis et inversement proportionnelles aux cubes des hauteurs et à la première puissance des largeurs des pièces. Dans le cas où la largeur des pièces resterait la même, il faudrait donc, pour n'avoir que les mêmes flèches, que les hauteurs et par conséquent les poids crussent dans le même rapport que les écartements des appuis. Dans le cas où la largeur ne serait point la même, et si l'on admettait par exemple que les sections fussent des figures semblables, il faudrait que le poids crût dans un rapport de 4 à 5, c'est dans le rapport de 9 à 10 que varieront la section, et par conséquent les poids des pièces. Si l'on calcule d'après ces bases, et en partant des prix connus, le prix de revient par mètre courant de la voie de fer, dans la double supposition de la division en quatre et en cinq intervalles, on verra qu'il y a économie de construction à préférer la division en cinq.

Cette appréciation suppose qu'on ne doit pas admettre de flèches plus grandes pour un certain écartement que pour un autre ; cette supposition est fondée sur ce que le mouvement du convoi devient d'autant moins agréable aux voyageurs, détermine des effets d'autant plus préjudiciables à l'entretien économique du chemin et des locomotives, et nécessite un d'autant plus grand effort de traction que les oscillations verticales sont plus fortes : il est donc nécessaire de ne point laisser ces oscillations se développer jusqu'à dépasser certaines limites déterminées. C'est là ce qu'admet l'appréciation sommaire qui précède.

La longueur du rail (4^m50) ne doit pas être partagée en intervalle égaux. On sait toute la différence de résistance que présente un solide simplement posé sur deux appuis ou complètement encastré. Pour les rails de chemin de fer, aucune partie ne peut être considérée comme absolument encastrée ou comme simplement posée sur des appuis ; mais il est hors de doute que les parties du milieu de chaque longueur du rail sont dans des conditions bien plus comparables à celles qui constituent l'encastrement que les parties extrêmes : il convient donc de diminuer la longueur d'écartement des appuis à mesure qu'on s'éloigne du milieu. Les longueurs de 0,70 - 1,00 - 1,10 - 1,00 - 0,70 sembleraient très susceptibles d'être adoptées avec avantage pour les cinq longueurs du rail.

4° Forme des rails.

Après avoir traité sommairement du mode d'établissement de la voie, de la largeur de la voie et de l'écartement des supports, il nous reste à passer en revue les différentes formes des rails et les divers systèmes d'attache que l'on peut employer dans un chemin de fer.

Les premiers rails que l'on a employé principalement pour les transports de marchandises, étaient en fonte composés d'une partie horizontale plate de $0^{m},09$ de largeur sur $0^{m},02$ d'épaisseur, avec un rebord supérieur vertical de $0^{m},04$ (fig. 31), et quelquefois aussi d'une nervure verticale inférieure ayant $0^{m},07$ centimètres de saillie au milieu et venant à lien aux deux bouts (fig. 32). La partie horizontale portait la roue, le rebord supérieur l'empêchait de quitter le rail, enfin la partie verticale en dessous n'avait d'autre but que de fortifier la première.

Ces rails étaient fixés sur des longines en bois par des clous à tête fraisée ; ou bien on les fixait sur des dez en pierre avec des chevillettes en fer que l'on enfonçait dans des chevilles en bois placées préalablement dans les dez.

On a maintenant abandonné cette forme de rails ; parce qu'elle favorise le séjour de la poussière, de la boue, et de l'eau dans l'ornière ; ce qui augmente le frottement et hâte la détérioration de la fonte ; de plus, le système d'attache au moyen de clous offre de graves inconvénients : les changements de température effectuent des tirages sur la tête des clous qui est bientôt enlevée à moins que le rail ne se courbe ; et quand ce rail prend une petite flèche sous la charge d'une voiture, le clou tend d'abord à se relever, mais il est bientôt aplati par le passage de la roue : ces mouvements en sens contraire finissent par briser la tête de la chevillette, et le rail n'a plus de solidité. Le même inconvénient se produit encore dans les chemins de fer américains qui sont composés de longines longitudinales sur lesquelles sont cloués les rails.

Après avoir renoncé à ce système, on a adopté des rails dont la section était en forme de *T* (fig. 33) et qui sur leur longueur présentaient inférieurement la forme des solides d'égales résistances (fig. 34). Mais on abandonna bientôt pour les chemins à grande vitesse les rails en fonte et on les remplaça par les rails en fer laminé qui offre sur les précédents de nombreux avantages.

1° Les rails en fonte rompent fréquemment et subitement.

2° On ne peut leur donner pour longueur que la distance entre deux supports, parce que la fonte étant peu flexible, il serait impossible de faire porter solidement ces rails sur plus de deux dez à la fois : or, chaque bout de rail n'ayant qu'une très petite longueur, les ondulations verticales et tous les inconvénients qui en sont les conséquences, étaient démesurément multipliée sur ces voies.

3° Les rails en fonte offrant une dureté assez grande à leur surface, mais sur une petite épaisseur, lorsque celle-ci était usée, la partie qu'elle recouvrait résistait très inégalement et devenait bientôt raboteuse et cahotante, d'où résultaient l'augmentation du tirage et de la dislocation de la voie.

Ces motifs et plusieurs autres ont déterminé à adopter les rails en fer laminé. Pendant quelques temps on a continué, bien qu'ayant changé la matière employée la longueur et le système de fixation du rail, à donner au-dessous du rail la forme de solive d'égale résistance, forme dite à ventre de poisson. Mais on n'a point tardé à abandonner aussi cette forme qui créait des sujétions de fabrication et de pose et qui, loin de renforcer le rail, le plaçait dans des conditions défavorables de

résistance ; dès l'instant qu'il ne s'agissait plus de solides séparés reposant isolément de dez en dez, mais bien de pièces continues qu'on pouvait considérer à très peu près comme encastrées sur les traverses. On sait, en effet, que ce n'est point au milieu des intervalles seulement, mais aussi aux points d'encastrement que les pièces encastrées tendent principalement à se briser.

La forme adoptée d'abord a été celle d'un *T*, la partie verticale ayant pour but de donner plus de force, puis on a accumulé à l'extrémité une certaine quantité de matière pour faire jouer un plus grand rôle aux fibres extrêmes qui s'opposent le plus efficacement à la flexion. On est arrivé en passant par des modifications successives, (fig. 35) à la forme de double T généralement adoptée maintenant. La saillie intérieure de la partie supérieure du rail ayant une tendance à se séparer de la partie verticale, on place généralement des contreforts pour relier entre elles ces deux parties ; on abat également les angles saillants et on arrive ainsi à une forme qui diffère très peu de celle indiquée (fig. 36). Un des grands avantages de la forme en double T, c'est que l'on peut placer le rail dans quatre sens par rapport au rebord de la roue ; cette nécessité de présenter successivement les différentes parties du rail au rebord de la roue ne vient pas de ce que le rail s'use par le roulement, car cette usure est invisible, non parce que le rail s'oxyde puisque cette oxydation n'a pas lieu pendant la circulation, mais parce que dans certains rails il se forme sur le bord des fissures longitudinales qui se prolongent souvent très loin. On peut prévenir dans une certaine mesure ces inconvénients en donnant au rail un léger bombement dans le sens transversal.

En Angleterre, sur le chemin de Bristol, on a essayé un système de rails ayant la forme indiquée (fig. 37) et fixé par des clous à têtes fraisées. Ce système ne paraît présenter aucun avantage réel et a quelques inconvénients provenant des clous qui les fixent.

Système d'attache.

Nous avons vu que, dans l'ancien système des ornières, les rails étaient fixés au moyen de clous, ce qui donne de très mauvais résultats. Dès que l'on a adopté les rails saillants, on les a terminés par des espèces d'oreilles qui s'appliquent sur les dez en pierre où on les fixait par des chevillettes ; dans ce système, les rails étaient juxtaposés bout à bout. La charge portait en définitive sur les quatre extrémités des oreilles (fig. 38), et pour que les surfaces supérieures de trois dez consécutifs ne fussent pas dans le même plan, les oreilles portaient à faux et la rigidité de la fonte ne permettant pas au système de fléchir, les oreilles qui reçoivent immédiatement l'action de wagons rompaient souvent.

L'idée vint d'interposer un troisième corps entre le rail et le dez, afin d'atténuer une partie du choc, et on fit reposer les rails sur le dez par l'intermédiaire d'une pièce en fonte nommée coussinet.

Ces coussinets étaient fixés aux dez par deux chevillettes et l'extrémité de chaque rail posant sur le coussinet était de plus traversée par un clou horizontal passant dans les deux joues du coussinet (fig. 39). On remarqua que les dez, qui s'enfoncent plus ou moins sous le poids des chariots, s'inclinaient en avant ou en arrière pendant le passage des wagons qui les passaient, qu'alors l'extrémité d'un rail était relevée tandis que celle du rail contigu était abaissé (fig. 40), d'où résultait une saillie brusque à la surface supérieure des railway et un choc nuisible aux rails, aux roues des wagons et à la force motrice.

Pour diminuer cet inconvénient on fit joindre les rails à mi-fer en les taillant et les croisant d'environ $0^{m},06$. Le coussinet n'était plus traversé que par un seul clou horizontal qui passait dans le joint des deux rails ; de plus, en abattant les angles de la partie horizontale sur laquelle s'appuient les rails et en lui donnant une forme convexe, le coussinet ne présentait qu'un point d'appui verticalement en-dessous du milieu du joint. Par cette disposition, chaque rail portait sur cette sommité, et le dez pouvait s'incliner en avant ou en arrière sans que le point d'appui changeât bien sensiblement, ou au moins les deux rails descendaient ensemble. Ce système présentait des inconvénients par suite des tiraillements de la cheville par la dilatation ou la construction longitudinale des rails.

On a cherché alors à lier les rails aux coussinets par un autre moyen que par les clous. On a ménagé dans l'une des joues de coussinet un renforcement dans lequel on fait entrer latéralement une partie en relief du rail ; pour appuyer le rail contre le coussinet qu'il ne touche que par une seule joue, on chasse entre l'autre joue et le rail un coin en bois ou en fer ; on l'introduit horizontalement et parallèlement à la longueur du rail dans une petite échancrure faite à la joue des coussinets pour donner entrée.

Dans le chemin de fer de Liverpool on a employé ce système avec 2 coins en fer ; en enfonçant ces coins on peut faire éclater la joue du coussinet ; c'est un inconvénient que ne présentèrent pas les coins en bois employés aux chemins de Roanne et de Denain. Mais dans ces derniers chemins on avait assujetti le rail à toucher le coussinet par un assez grand nombre de points ; et on lui a laissé une très grande hauteur en dehors du coussinet, de la dite position qui obligeait au contact en plusieurs points résultaient des difficultés de pose, et quelque chose de variable dans la position du rail ; de la grande hauteur du rail au-dessus du coussinet, une fâcheuse tendance au déversement, un manque de solidité.

Au chemin de Leeds et Selby, le rail, excepté la partie supérieure, fut entièrement engagée dans le coussinet ; il ne repose sur la joue que par deux points seulement, et il est pressé par un coin en bois d'une forme un peu contournée (fig. 41).

Enfin dans le système actuel on emploie des coins en bois qui soutiennent le rail très près de la tête et qui ne présentent pas les formes contournées du rail de Selby (fig. 42).

Les coins ont été mis successivement en dedans et en dehors de la voie. Lorsqu'ils sont en dehors l'action des wagons qui poussent toujours les rails de ce côté est transmise moins brusquement au coussinet, et la partie supérieure *A* du coussinet (fig. 43) se trouve surplombée par la saillie du rail et échappe ainsi au rebord de la roue. Cela permet d'ailleurs de recouvrir les coins de sable et de les soustraire un peu aux influences atmosphériques qui les dessécheraient, augmenteraient leur jeu et en rendraient la destruction plus rapide.

5° Indications succinctes touchant la rédaction des projets.

Il a été donné précédemment des principes généraux sur la construction des ouvrages d'art, à quelque voie de communication qu'on les destine. Dans l'exposé sur le chemin de fer d'Orléans des indications spéciales ont été présentées sur les conditions particulières auxquelles doivent satisfaire les ouvrages d'art à construire pour l'établissement des railways. Nous n'ajouterons ici que deux ou trois observations sommaires.

Les ponts construits au-dessous des chemins de fer doivent être en général construits en maçonnerie, à moins que des difficulté graves ne s'y opposent ; il y a d'autant plus lieu de tenir à l'observation de cette recommandation que les ponts doivent avoir une plus grande portée. Les conditions d'élasticité que présentent le bois, et le fer, ne sont point en ce cas favorable ; et il y a d'ailleurs des motifs d'autre nature qui tendent également à en faire repousser l'emploi.

Les ponts suspendus ont trop de mobilité pour qu'on puisse impunément les charger des masses énormes qui composent un convoi. Il a été fait de ce mode de construction un ou deux essais qui n'ont point été heureux, il a fallu soutenir après-coup les planchers par des formes ou ceintres construits en sous-oeuvre. C'était là un résultat qu'on pouvait prédire sans difficulté.

En supposant même que ces ponts eussent offert une résistance directe, suffisante au moment de leur exécution, ils eut été à craindre que la continuité des vibrations résultant du passage des convois n'altérât progressivement la texture des fils composant les câbles ou des barres composant les chaînes ; et que dans un laps de temps assez court, le passage des convois ne put pas s'effectuer sans danger.

Cette observation ne s'applique point seulement, on le conçoit, aux fers employés dans les ponts suspendus ; elle s'applique généralement aux fers et aux fontes employés de manière quelconque pour l'établissement de travées au-dessous des chemins de fer ; cependant lorsqu'il s'agit de franchir de très petits passages pour lesquels on pourra aisément employer des poutres présentant un grand excès de résistance. Il sera bien, en nombre de cas, d'employer la fonte : ce qu'il sera prudent de s'interdire, c'est de construire sans nécessité bien constatée de grands ponts en fonte, tant qu'on aura pas acquis une expérience plus complète sur l'importance des effets que doit produire sur cette nature d'ouvrage l'exploitation ordinaire d'un chemin de fer.

Quand aux ponts en charpente, ils ont contre eux et les réparations fréquentes auxquelles ils peuvent donner lieu, et la rapide destruction à laquelle sont exposés leurs assemblages constamment mis en jeu par des charges énormes. Si on en devait nécessairement construire il serait convenable de n'y admettre que des pièces à section planes, sans tenons ni mortaises, et reposant sur des semelles ou des emboîtements en fonte convenablement disposés.

À ces observations sommaires, il nous paraît utile d'ajouter quelques indications sur le montant des dépenses que nécessitent habituellement les acquisitions et travaux indispensables pour l'établissement d'un chemin de fer.(*)

Ces indications qui peuvent permettre d'apprécier en premier et par voie de comparaison, le plus ou moins d'importance des sommes à dépenser pour l'exécution d'un avant-projet, se rapportent à l'étendue de la zone de terrain à acquérir, au cube et au prix moyen des terrassements par mètre

---

(*) Ces indications sont tirées d'un rapport lu au Conseil des Ponts et Chaussées par M. l'Inspecteur Divisionnaire Mallet, au nom d'une Commission composée de MM. Fèvre, Kemmangant, Minard, Silguy et Mallet Rapporteur.

courant, au prix moyen par Kilomètre des ouvrages d'arts ordinaires, au prix des souterrains et au prix des matériels d'exploitation ; le tout déduit des résultats observés sur un certain nombre de chemins construits jusqu'ici.

Largeur moyenne des terrains à acquérir pour l'établissement d'un chemin de fer.

La largeur moyenne de terrains à acquérir pour l'établissement des chemins de fer dans des pays un peu accidentés, peut être évaluée de 35 à 40 mètres. Cette largeur qui, au premier abord peut paraître exagérée, est nécessaire par plusieurs causes, dont les principales sont :

1° L'empattement des talus qu'exigent les déblais et les remblais, souvent considérables d'un chemin de fer.
2° Les dépôts et les emprunts de terre que l'on est fréquemment obligé de faire à proximité du chemin pour éviter les trop longs transports.
3° Les chemins latéraux de 3, 4, 5 et quelquefois 6^{m} de largeur, que les habitants réclament avec raison, et que les commissions d'enquête admettent facilement, pour le rétablissement des communications interceptées et pour la desserte des propriétés coupées par le chemin de fer.
4° Les fossés latéraux indispensables pour rétablir le cours des eaux, modifié par la construction du chemin.
5° Les gares d'évitement et de stationnement et leur dépendance.

Dans un tableau récapitulatif des superficies de terrain acquises pour le chemin de fer d'Orléans, on voit que la largeur moyenne est en effet de $40^{m},61$.

Une note émanée de M. Talabot évalue à $44^{m},40$ la largeur moyenne des terrains achetés pour le chemin de fer d'Alais à Beaucaire.

Au chemin de fer de Rouen, l'on a acheté 430 ha. pour une longueur de 127 Kilomètres : la largeur moyenne est par conséquent de $33^{m},80$. Cette surface ne comprend pas les gares, du moins les principales.

Cube et Prix moyen du terrassement par mètre courant.

Le cube de terrassement du chemin de Rouen est de $3,188,399^{m}$ pour une distance de $122,324^{m}$. Ces deux chiffres donnent par mètre courant . . . . . $25^{m}50$.

Au chemin d'Orléans ce cube est de . . . . . $33^{m}00$.

Il est de $22^{m}00$ à celui de Montpellier à Nîmes.

Au chemin de fer d'Orléans le prix moyen du mètre cube de terrassement a été de $1^{fr}.50^{c}$; à celui de Rouen, il est de $1^{fr}68^{c}$; il paraît devoir être de $1^{fr}45^{c}$ à celui de Montpellier à Nîmes.

Prix moyen des ouvrages d'art par Kilomètre.

Au chemin d'Orléans, sur une longueur de 133^{k} les ouvrages sont au nombre de 221, non-compris le passage du Boulevard extérieur à Paris, lequel a coûté . . . . . $205,000^{fr}$.

Le passage de Choisy . . . . . 160,000.
Le viaduc de l'Orge . . . . . 250,000.
Le viaduc de l'Yvette . . . . . 100,000.
Deux viaducs à Étampes . . . . . 220,000.
6 — ayant coûté . . . . . **935,000^{fr}**

La dépense à laquelle les 221 ouvrages d'art ordinaires ont donné lieu est de . . . . . **3,765,000^{frP}**.

Au chemin de Rouen, sur une largeur de 127^{k} mesurée à partir de son embranchement avec le chemin de St Germain jusqu'à Rouen, l'on compte 221 ouvrages d'art, non-compris quatre grands ponts sur la Seine qui ont coûté environ . . . . . 2,900,000^{fr}.

Ces 221 ouvrages ont coûté. . . . . 3,220,000^{fr}.

Les chemins de Montpellier à Nîmes sur une longueur de 50,000^{m}, présente 98 ouvrages d'art (non-compris le viaduc de Nîmes), qui coûteront . . . . . 1,600,000^{fr}.

Le prix moyen de chaque ouvrage d'art ordinaire sera en conséquence, au chemin d'Orléans de . . . . . 17,056^{fr}.

A celui de Rouen de . . . . . 14,570.

Et à celui de Montpellier à Nîmes de . . . . . 16,300.

Il y aura pour chaque lieue de 4,000^{m}, sur le chemin d'Orléans 6,65 ouvrages d'art ordinaire, coûtant . . . . . 113,000^{fr}.

Sur celui de Rouen 6,95 ouvrages d'art ordinaires au prix de . . . . . 101,000.

Les ouvrages d'art au chemin de Montpellier à Nîmes sont au nombre de 7,44 par lieue et coûteront . . . . . 128,000^{fr}.

Prix des souterrains.

Le prix des souterrains varie dans des limites très étendues.

Les souterrains de St Quentin en France et de Medway en Angleterre, n'ont coûté que 7 à 800 fr. le mètre courant, tandis que celui de Pouilly est revenu à 2,000 fr. ; celui de la Coloncelle à 3,000 fr. et celui de St Cloud à 2,180^{fr}. En Angleterre, ceux de Liverpool (le troisième) de Clay-Cron, de Kiloby et de Box, ont coûté par mètre courant 2,220^{fr} — 2,780^{fr} — 3,400^{fr} — et 2,500^{fr}.

Les souterrains du Chemin de fer de Paris à Rouen, dont la longueur totale est de 5,106 mètres ont été adjugés au prix de 1104.57 le mètre courant. L'on n'a trouvé dans la plupart, comme on l'avait prévu, que des bancs calcaires assez tendres, séparés par des couches siliceuses ; mais, à celui de Rolleboise, le plus long de tous (il a 2600^{m}), cette homogénéité de sol s'est démentie, et une espèce de Poudingue composé de cailloux siliceux enchâssés dans une gangue calcaire très dure s'est rencontré sur 600^{m} de longueur, et cela sur une section entière de la galerie. De là une augmentation de dépenses de 1000^{fr} par mètre courant ; de sorte que le souterrain de Rolleboise a coûté, en répartissant ce surcroît de dépenses sur toute la longueur, 1335^{fr} au lieu de 1104.57.

Prix du matériel d'exploitation.

Le matériel roulant du chemin de Londres à Birmingham, dont la longueur est de 480[k] 5.[(*)] a une valeur de 8,400,000[fr], i.e. par Kilomètre . . . . . 46,500[fr]

Celui du chemin de Londres à Southampton est, pour une longueur de 123 K. de 5,000,000[fr] i.e. par Kilomètre . . . . . 40,650.

Celui du chemin de Grande jonction pour une longueur de 133 Kilom. est de 5,400,000[fr] i.e. par Kilomètre . . . . . 40,600.

Le matériel du chemin d'Orléans est pour 133 K. de 4,700,000[fr] i.e. par Kilomètre . . 36,340.

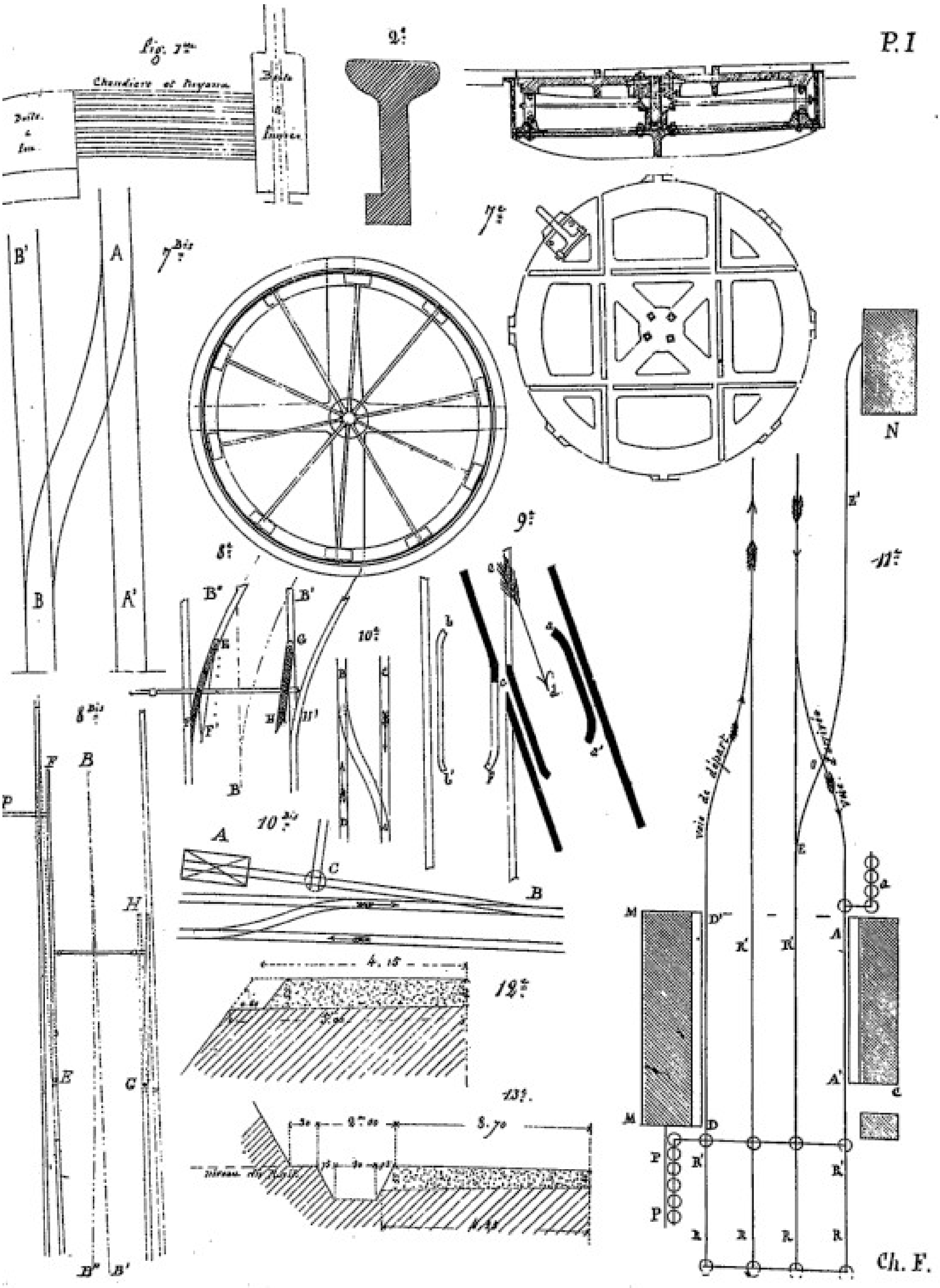
Enfin celui du chemin de Belgique est, pour une longueur de 561 Kilomètres[(**)], de 20,600,000[fr] i.e. par kilomètre . . . . . 38,148.

Total . . . . . 202,238[fr]

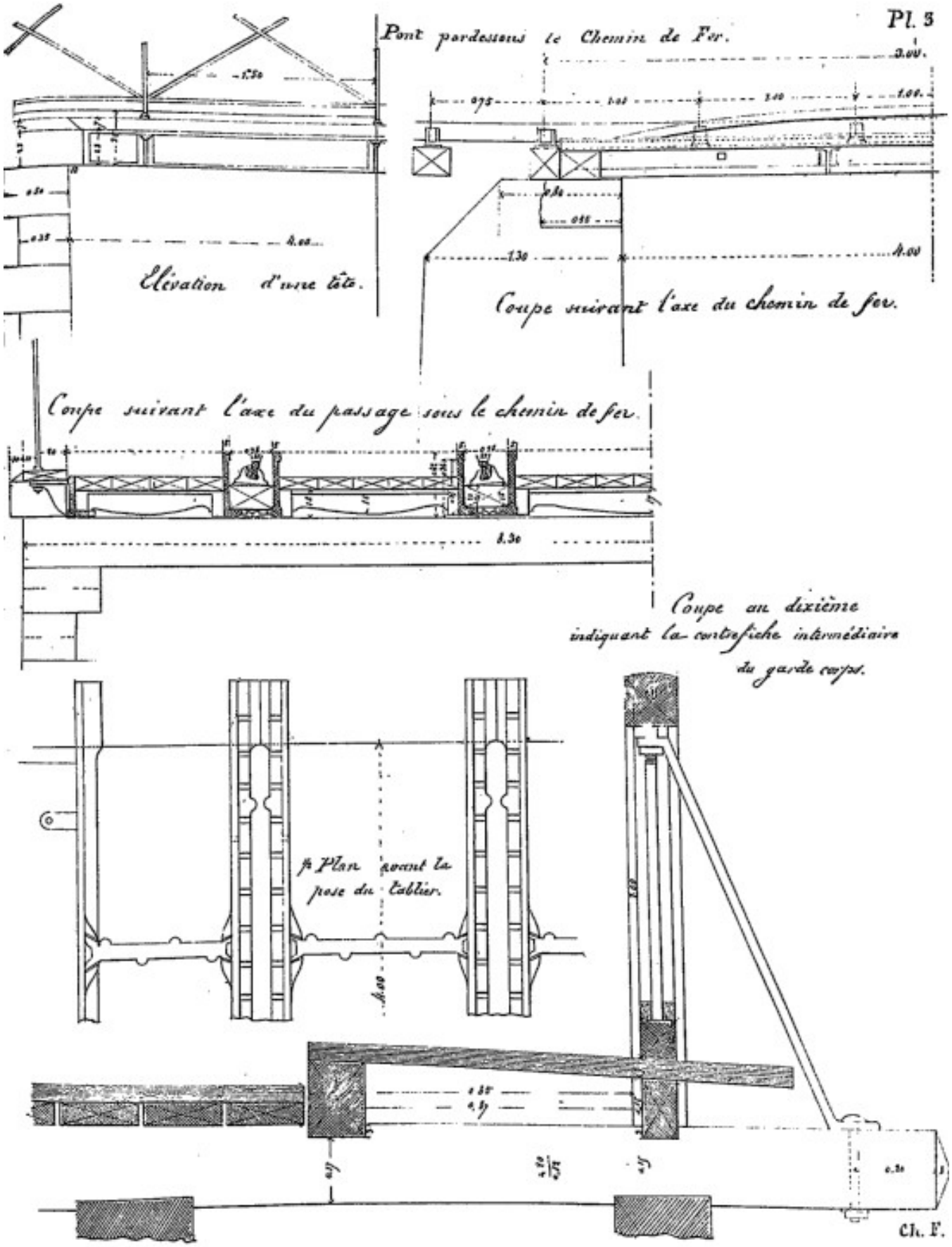
La moyenne de tous ces nombres est de 40,000[fr] par Kilomètre.

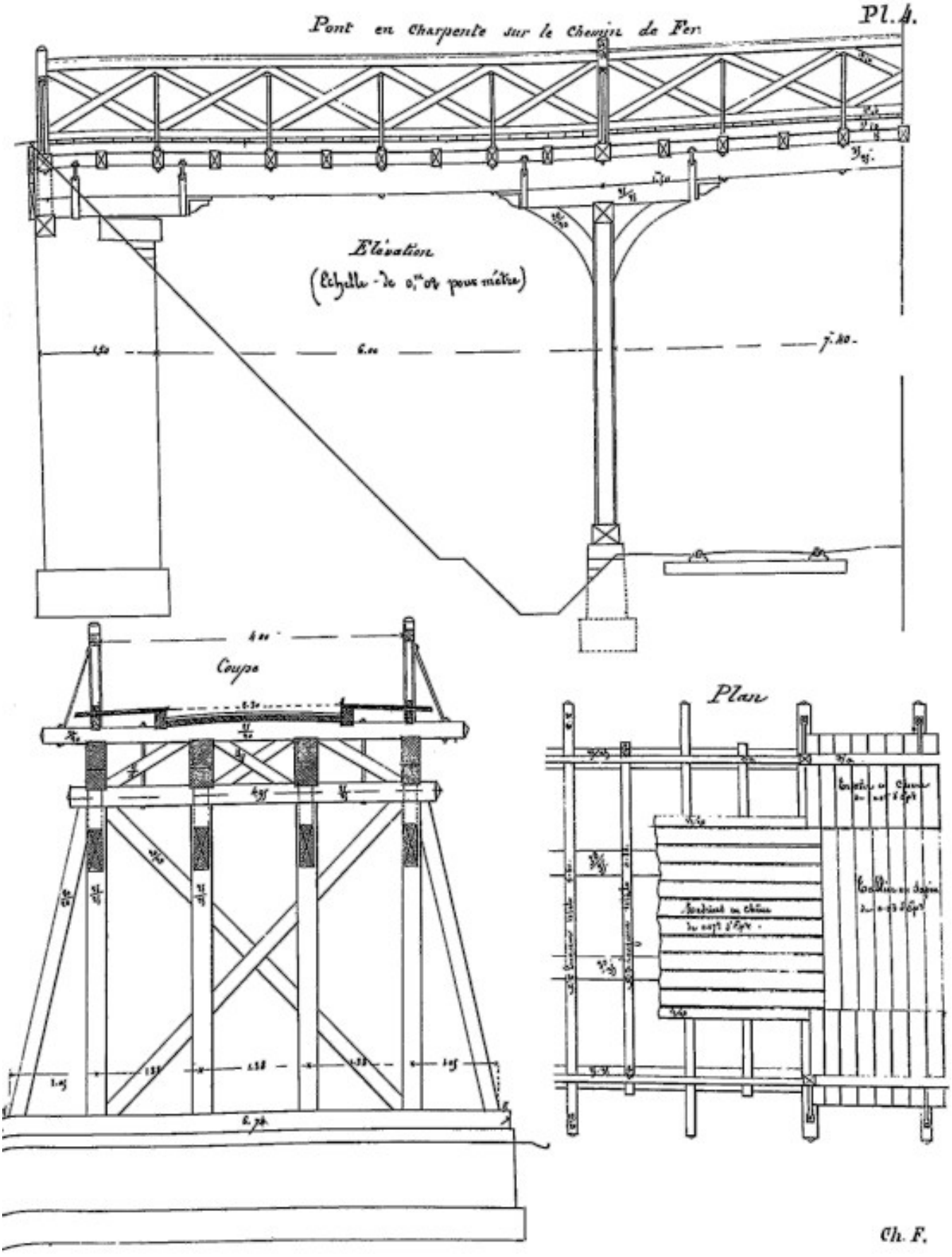
(*) Erreur dans le manuscrit : il est écrit 480 Km alors que la distance est de 180 Km. Le prix indiqué est donc correct.

(**) Ici aussi, le calcul ne tombe pas juste. Erreur dans les données kilométriques initiales (il devrait y avoir 540 Km)


P. I
voie de départ
4.15
8.70
Ch. F.

Pl. 2.
Demi profil pour le sable, lorsqu'on est en remblai.
4.15.
fig. 3.
Demi profil pour le sable, lorsqu'on est en déblai.
fig. 4.
Demi profil pour la pierre cassée, lorsqu'on est en remblai.
fig. 5.
Demi profil pour la pierre cassée lorsqu'on est en déblai.
fig. 6.
CH. F.


Pont pardessus le Chemin de Fer.
Pl. 3
Elévation d'une tête.
Coupe suivant l'axe du chemin de fer.
Coupe suivant l'axe du passage sous le chemin de fer.
Coupe au dixième
indiquant la contrefiche intermédiaire
du garde corps.
Plan avant la
pose du tablier.
Ch. F.


Pont en Charpente sur le Chemin de Fer
Pl. 4.
Élévation
(Echelle de 0,m 02 pour mètre)
Coupe
Plan
Ch. F.

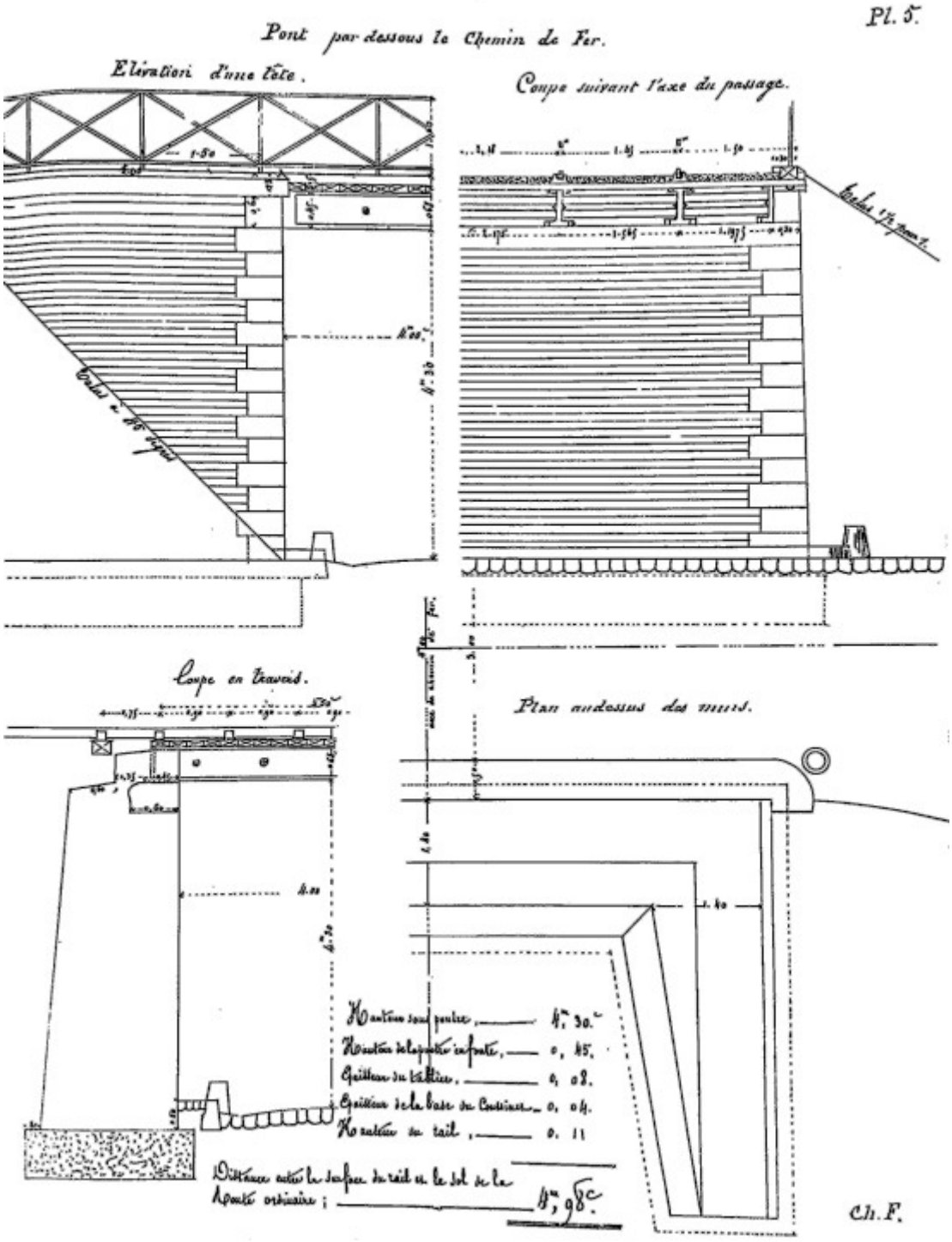
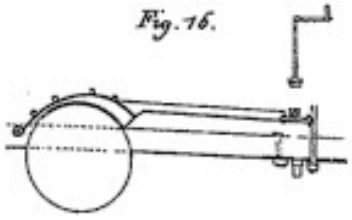

Pont par dessous le Chemin de Fer.
Elévation d'une tête.
Coupe suivant l'axe du passage.
Coupe en travers.
Plan au dessus des murs.
Hauteur sous poutre, 4m. 30c
Hauteur de la poutre inférieure, 0, 45.
Epaisseur du tablier, 0, 08.
Epaisseur à la base du Contreventement, 0, 04.
Hauteur du rail, 0. 11
Différence entre le dessous du rail et le sol de la Route ordinaire ; 4m, 98c
Ch. F.

Fig. 18.

Pl. 6.

Fig. 16.



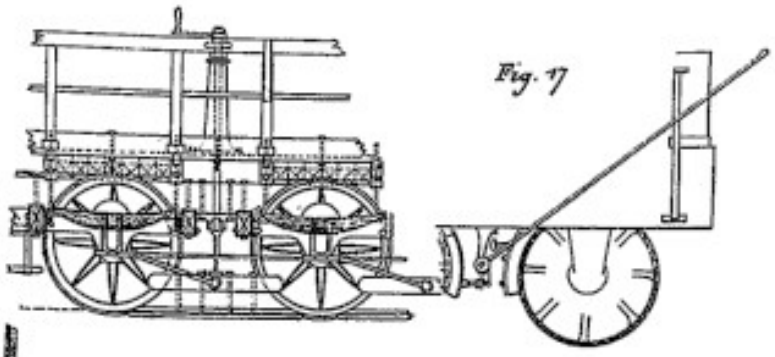


Fig. 17

Fig. 16bis

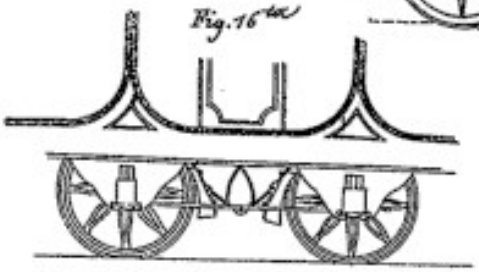


Fig. 19.

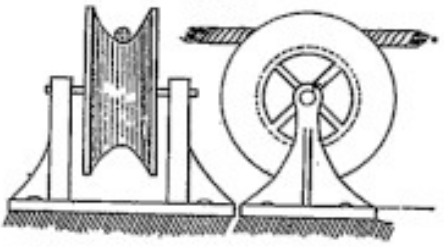


Fig. 16ter

Fig. 21.

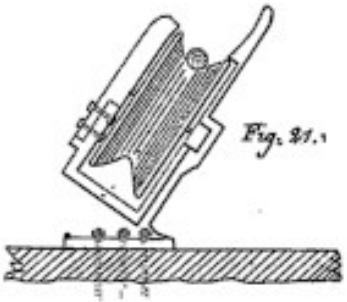
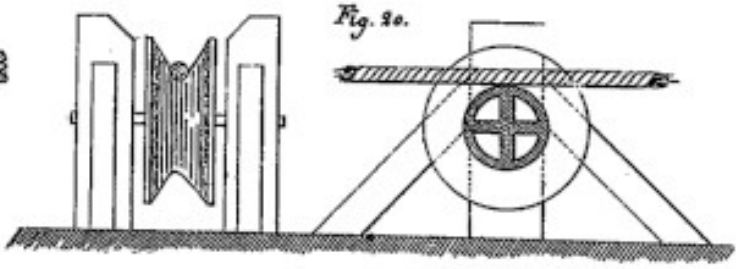


Fig. 20.



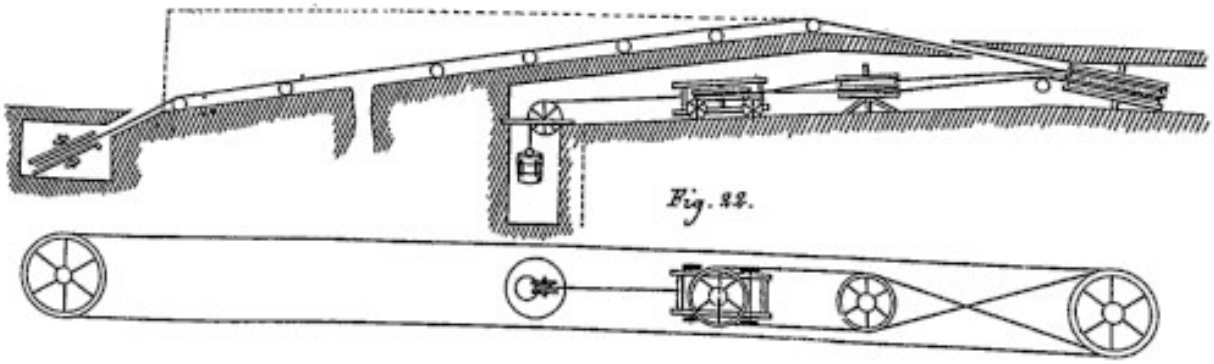


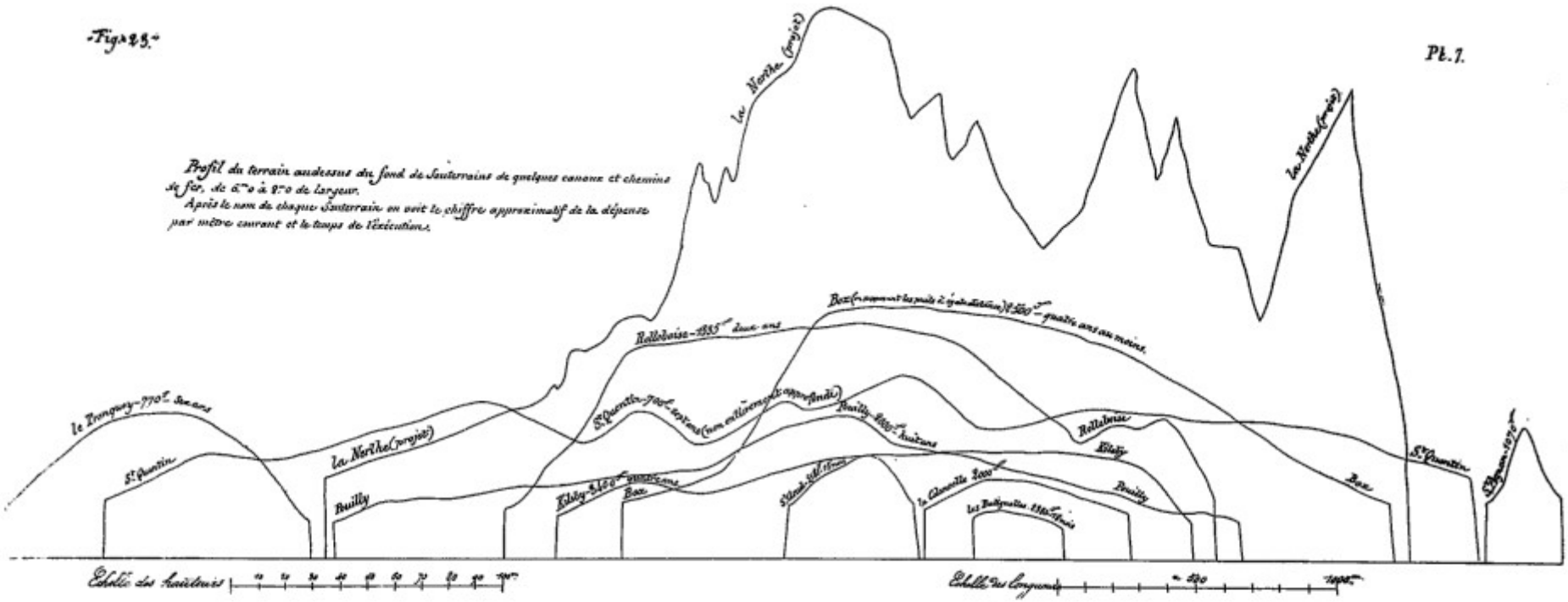
Fig. 22.

CH.F

Fig. 23.

Pl. 1.

Profil du terrain au dessus du fond de Souterrains de quelques canaux et chemins de fer, de 6.m 0 à 9.m 0 de largeur.
Après le nom de chaque Souterrain on voit le chiffre approximatif de la dépense par mètre courant et le temps de l'exécution.



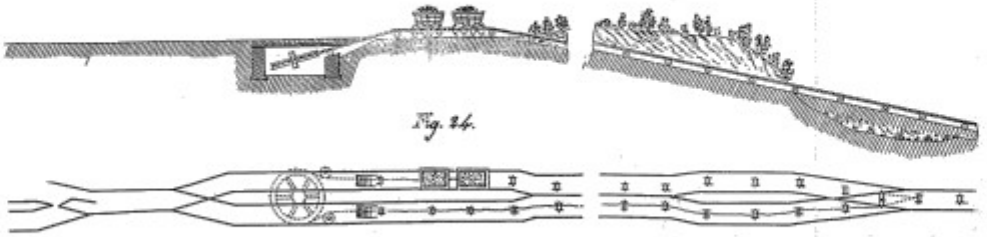


Fig. 24.

CH.P.

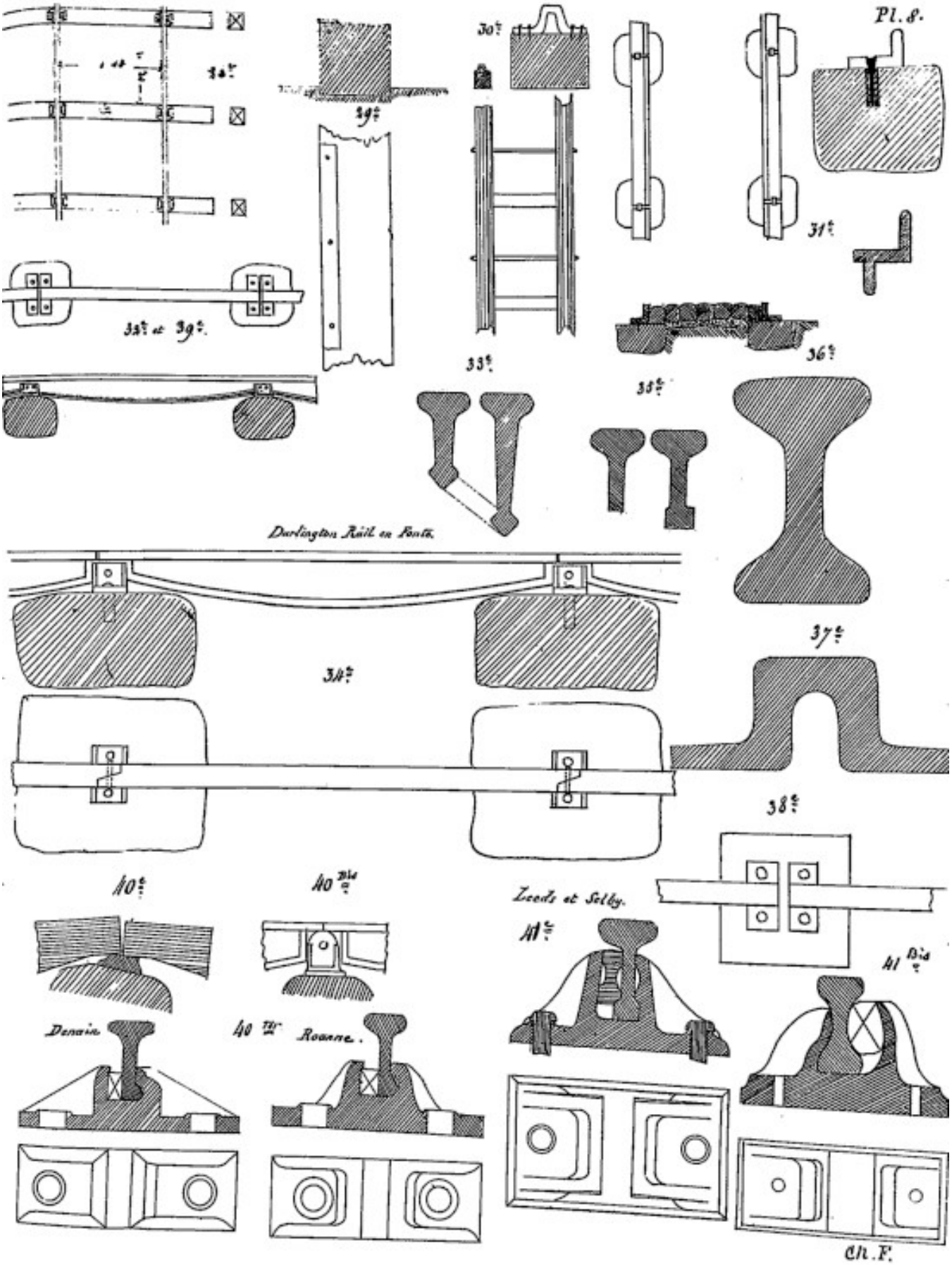

Pl. 8.
Darlington Rail en Fonte.
Leeds et Selby.
Denain
Roanne.
Ch. F.

Table des matières

Notes prises au cour de chemin de fer (1842 – 1843).....1
1ère Leçon.....1
Idées générales sur l'exploitation *d*'un chemin de fer.....1
Poids des voitures et wagons.....6
2e Leçon.....8
Discussion des Formules.....10
De l'effet utile.....12
3e Leçon.....13
De l'effet utile maximum.....13
Des moyens de gravir les rampes sur les chemins de fer.....15
Description des travaux du chemin de Fer de Paris à Orléans.....21
5e Leçon.....26
6e Leçon.....30
Des terrassements.....30
De la surface supérieure du sol en remblai.....30
Des moyens de consolider les talus.....32
Des moyens de transport pour effectuer les terrassements.....33
7e Leçon.....34
Des travaux d'art.....34
I. Des travaux extraordinaires.....35
II. Des travaux ordinaires.....36
I. Des passages à niveau.....36
II. Des ponts et aqueducs par dessous le chemin de fer.....37
III. Des ponts par dessus le chemin de fer.....41
8e Leçon.....42
Notes prises au cours de chemin de fer.....50
Des principes qui doivent présider à la détermination des tracés de chemin de fer.....50
Tracés généraux.....59
Des inconvénients et des dangers résultants des courbes de raccordement et des moyens proposés pour faciliter la circulation des convois dans les courbes de petit rayon.....62
Établissement de la voie.....68
1° Largeur de la voie.....68
2° Mode d'établissement de la voie.....69
3° De l'écartement des supports et du poids des rails.....71
4° Forme des rails.....72
Système d'attache.....73
5° Indications succinctes touchant la rédaction des projets.....75
Largeur moyenne des terrains à acquérir pour l'établissement d'un chemin de fer.....76
Cube et Prix moyen du terrassement par mètre courant.....76
Prix moyen des ouvrages d'art par Kilomètre.....76

Prix des souterrains..... 77
Prix du matériel d'exploitation..... 78
Planche 1..... 79
Planche 2..... 80
Planche 3..... 81
Planche 4..... 82
Planche 5..... 83
Planche 6..... 84
Planche 7..... 85
Planche 8..... 86